

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОКРЫТИЯ ПГ-СР2, СФОРМИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

© 2019

**Н.Н. Соболева**, кандидат технических наук,

научный сотрудник лаборатории конструкционного материаловедения

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

**A.B. 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)*

**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-СР2; фрикционная обработка; профилометрия; микрондентирование.

**Аннотация:** Порошок марки ПГ-СР2, имеющий систему легирования Ni–Cr–B–Si, применяется для лазерной наплавки на детали, работающие в условиях износа, коррозии, эрозии и повышенных температур. Значительная волнистость и шероховатость поверхности, получаемая в результате лазерной наплавки, в настоящее время устраняется шлифованием абразивными кругами. Ранее авторами была показана возможность проведения финишной фрикционной обработки покрытия ПГ-СР2 индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора на воздухе при нагрузке 350 Н. Однако при проведении фрикционной обработки повышение нагрузки на индентор может влиять неоднозначно. Кроме того, ранее не было рассмотрено состояние инденторов после проведения фрикционной обработки покрытия ПГ-СР2, что является одним из важных аспектов выбора технологических параметров фрикционной обработки. Поэтому в настоящей работе изучалась твердость, качество поверхности покрытия ПГ-СР2 после проведения фрикционной обработки при нагрузках на индентор 350 Н и 500 Н, проводилось сравнение с характеристиками поверхности после электрополировки и шлифовки, а также исследовалась поверхность инденторов после таких обработок. Показано, что в процессе проведения фрикционной обработки при нагрузке 500 Н на поверхности покрытия ПГ-СР2 происходят процессы схватывания, приводящие к формированию поверхности с повышенной шероховатостью и препятствующие максимальному деформационному упрочнению покрытия. Это приводит к переносу материала покрытия на поверхность вершины индентора. Химический состав на поверхности индентора после фрикционной обработки при нагрузке 350 Н не меняется, кроме того, такая обработка формирует наиболее твердую и качественную поверхность с пониженными параметрами шероховатости, и может быть рекомендована в качестве финишной упрочняющей операции получения деталей с покрытием ПГ-СР2.

### ВВЕДЕНИЕ

Лазерная наплавка является современным способом нанесения защитных покрытий для снижения износа и коррозии деталей машин и инструмента [1]. В процессе лазерной наплавки тонкий поверхностный слой основного металла оплавляется лазерным лучом совместно с присадочным материалом [2; 3]. В работах [4–6] отмечается превосходство процесса лазерной наплавки перед другими методами наплавки в связи с отличным metallurgическим сцеплением с подложкой и получением покрытия, обладающего высокой однородностью и твердостью.

Порошки для деталей, работающих в условиях износа, коррозии, эрозии и повышенных температур, регламентируются ГОСТ 21448-75. Одним из сплавов, предназначенных для наплавки или напыления деталей, подвергающихся изнашиванию при нагреве до 600°C, является сплав марки ПГ-СР2, имеющий систему легирования Ni–Cr–B–Si. Покрытия такой системы используются для нанесения на валы и валки прокатных станов, плунжеры, экструдеры, шестерни, лопатки вентиляторов и дробеметов, насосные вкладыши и др. [7–9].

Поверхность после лазерной наплавки характеризуется значительной волнистостью и шероховатостью [10], и финишной операцией обработки покрытий

в настоящее время является шлифование абразивными кругами [11]. Этот метод имеет недостатки, в частности, отмечается возможность появления микротрещин и прижогов на обрабатываемой поверхности. В связи с этим авторами была предложена финишная фрикционная обработка покрытия ПГ-СР2 и показана ее эффективность [12; 13].

Фрикционная обработка поверхности металлических изделий обеспечивает деформационное упрочнение поверхностного слоя деталей, а также позволяет формировать поверхности с пониженной шероховатостью, что важно для практического применения [14]. Технологические параметры фрикционной обработки включают материал индентора, нагрузку на индентор, среду обработки. Изменение указанных параметров значительно влияет на шероховатость, твердость и другие эксплуатационные свойства изделий. С одной стороны, повышение нагрузки на индентор при проведении фрикционной обработки может дополнительно повысить показатели твердости и глубины упрочненного слоя в результате накопления пластической деформации в поверхностном слое, а с другой – снизить качество поверхности в связи с возможным развитием процессов схватывания и разрушения поверхностного слоя [15].

В работах [12; 13] описан процесс фрикционной обработки поверхности покрытия ПГ-СР2, который проводился при следующих технологических параметрах: индентор из мелкодисперсного кубического нитрида бора, нагрузка на индентор 350 Н, среда обработки – воздух. Научный и практический интерес представляет изучение возможности проведения обработки покрытия ПГ-СР2 при большей нагрузке.

Кроме того, эффективность внедрения новой технологии в производство должна рассматриваться не только с точки зрения улучшения свойств деталей, но и с учетом сопутствующих этому расходов, в частности, на замену инденторов. Ранее не было рассмотрено состояние инденторов после проведения фрикционной обработки покрытия ПГ-СР2, а это должно являться одним из аспектов выбора технологических параметров фрикционной обработки.

Цель работы – изучение твердости и качества поверхности покрытия ПГ-СР2 после проведения фрикционной обработки при различной нагрузке на индентор, а также исследование поверхностей инденторов после таких обработок.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве материала для покрытий использовался порошок марки ПГ-СР2 химического состава, масс. %: 0,48 % C; 14,8 % Cr; 2,6 % Fe; 2,9 % Si; 2,1 % В; остальное – Ni. Наплавку порошка осуществляли на пластины из стали Ст3 СО<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. Наплавку проводили в два прохода.

Фрикционную обработку осуществляли на лабораторной установке на плоских наплавленных образцах с электрополированной поверхностью при возвратно-поступательном движении полусферического индентора из мелкодисперсного кубического нитрида бора. Нагрузка на индентор составляла 350 Н и 500 Н. Фрикционную обработку проводили на воздухе при пятикратном сканировании поверхности индентором со средней скоростью 0,013 м/с, длиной хода 18 мм, смещением индентора 0,1 мм на двойной ход. В процессе фрикционной обработки измеряли и непрерывно регистрировали силу трения. Коэффициент трения  $f$  при этом определяли как отношение силы трения к нагрузке на индентор.

Микротвердость по методу восстановленного отпечатка измеряли на микротвердомере Wilson&Wolpert 402 MVD при нагрузках 0,0245 Н на индентор Виккерса. Для измерения параметров шероховатости и получения 3-д профилометрии поверхностей использовали бесконтактный профилометр-профилограф Optical profiling system Veeco WYKO NT 1100, работающий по принципу интерферометрического микроскопа [16]. Поверхности инденторов изучали с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) VEGA II XMU Tescan, оборудованного волнодисперсионным (Inca Wave 700) и энергодисперсионным (INCA Energy 450 XT) микроанализаторами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 приведены значения микротвердости, а также различных параметров шероховатости поверхности образцов с покрытием ПГ-СР2 после электрополировки, шлифовки на станке, а также фрикционной обработки индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора на воздухе при нагрузках 350 Н и 500 Н.

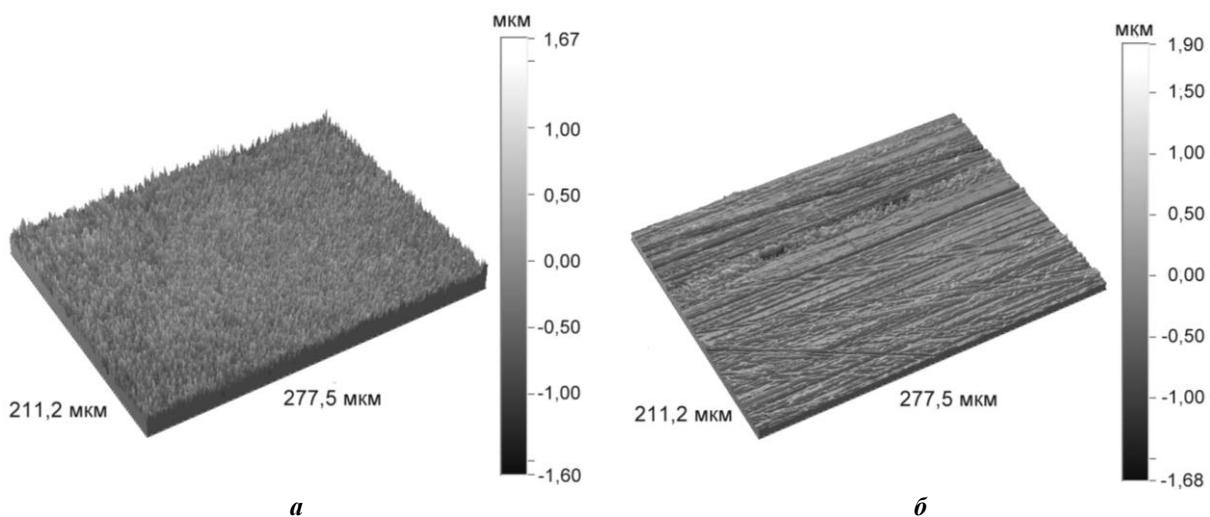
Видно, что фрикционная обработка при обеих нагрузках обеспечила рост показателя микротвердости покрытия по сравнению со значениями показателя микротвердости в электрополированном и шлифованном состояниях, при этом наибольшее значение показателя микротвердости (855 HV 0,025) наблюдается после обработки при нагрузке 350 Н.

Результаты измерения показателя шероховатости (см. таблицу 1) свидетельствуют об одинаковом уровне среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$ , рассчитанного по всей измеренной матрице [17], а также о среднеквадратичной шероховатости  $Rq$ , показывающей среднее значение измеренных отклонений для всей измеренной матрицы [18], после шлифовки на станке и фрикционной обработки при нагрузке 350 Н. Электрополированное состояние характеризуется незначительным увеличением этих параметров. В то же время фрикционная обработка при нагрузке 500 Н приводит к существенному росту указанных параметров шероховатости.

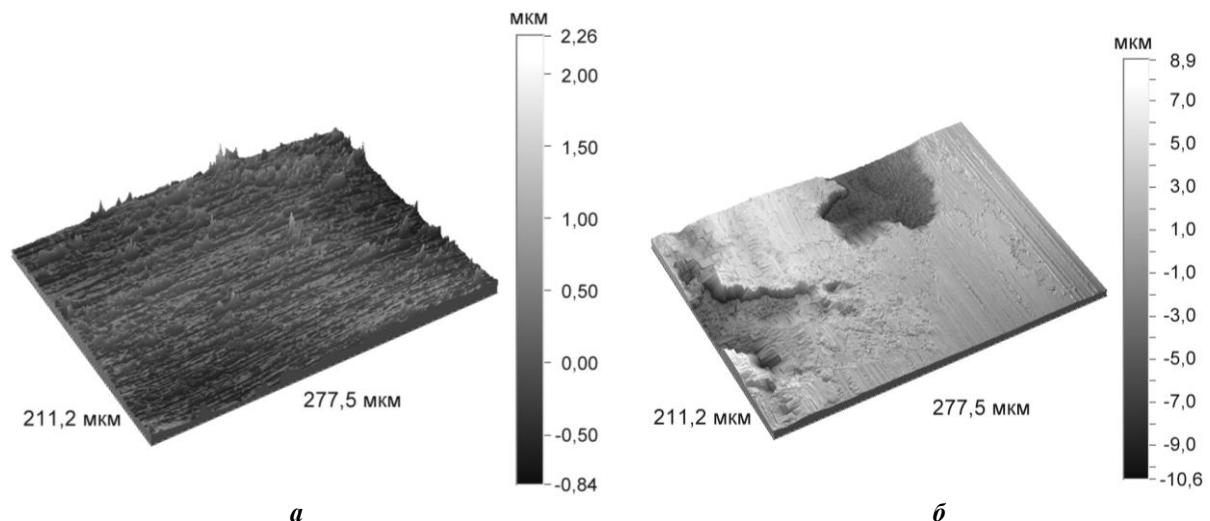
3-д профилометрия на рис. 1 и рис. 2 наглядно показывает формирование довольно качественных поверхностей после электрополировки, шлифовки на станке и фрикционной обработки при нагрузке 350 Н, при

**Таблица 1.** Влияние обработки поверхности покрытия ПГ-СР2 на микротвердость HV 0,025 и параметры шероховатости  $R_a$ ,  $Rq$ ,  $Rz$ ,  $Rt$

Вид обработки	HV 0,025	Параметры шероховатости на участке 211×278 мкм			
		$R_a$ , мкм	$Rq$ , мкм	$Rz$ , мкм	$Rt$ , мкм
Электрополировка	570	0,23–0,27	0,30–0,35	2,91–3,39	3,24–4,21
Шлифовка на станке	740	0,17–0,22	0,22–0,29	2,13–3,08	2,40–3,58
Фрикционная обработка при нагрузке 350 Н	855	0,17–0,23	0,22–0,29	1,97–2,50	2,38–3,10
Фрикционная обработка при нагрузке 500 Н	805	0,79–2,71	1,04–3,57	12,46–18,71	13,68–19,45



**Рис. 1.** Трехмерные профилограммы образца с покрытием ПГ-СР2 после электрополировки (а) и шлифовки на станке (б)



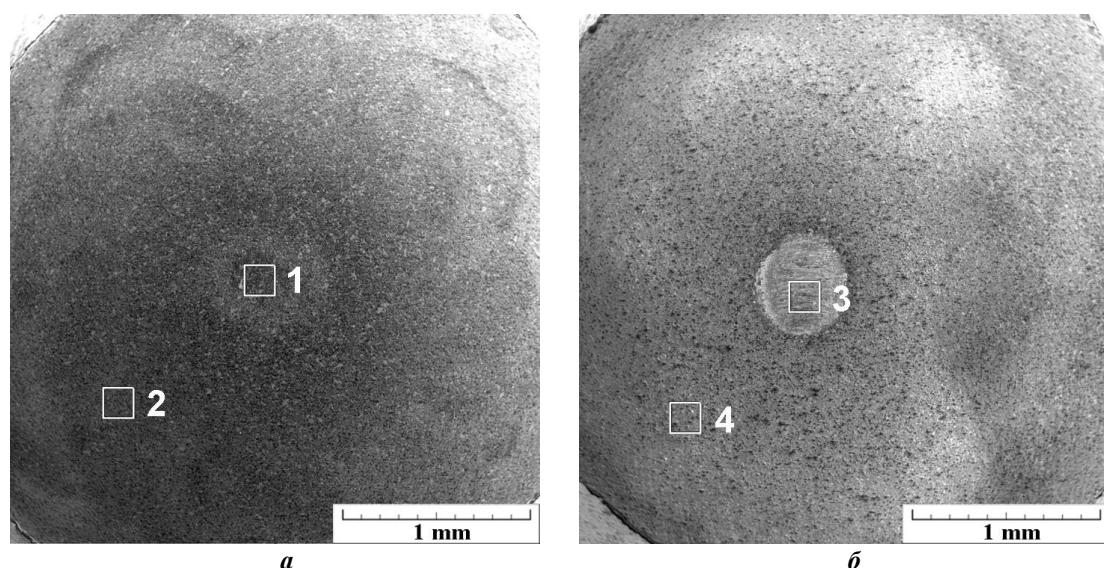
**Рис. 2.** Трехмерные профилограммы образца с покрытием ПГ-СР2 после фрикционной обработки индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора на воздухе при нагрузке 350 Н (а) и 500 Н (б)

этом на поверхности покрытия в процессе фрикционной обработки при нагрузке 500 Н интенсивно происходят процессы схватывания.

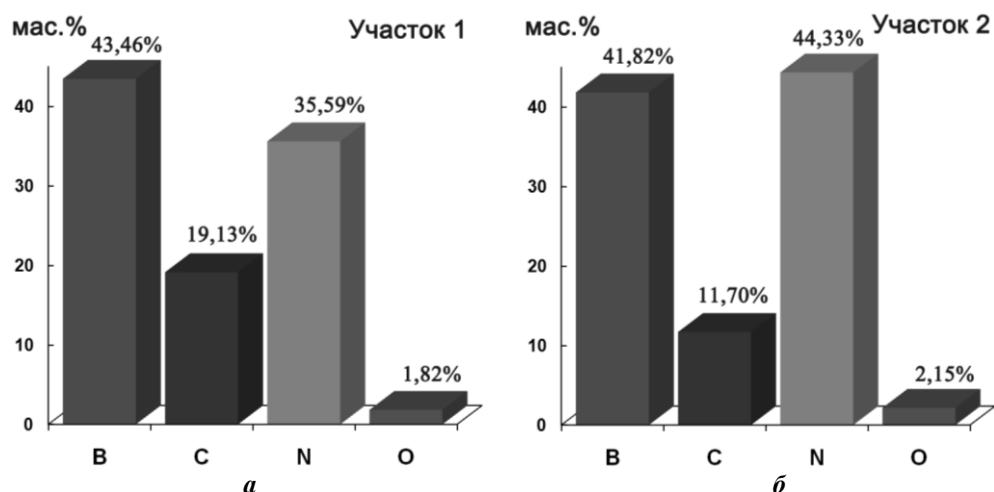
Однако при изготовлении деталей важны различные параметры шероховатости [18]. Анализ суммы средних абсолютных значений десяти наибольших выступов и десяти наименьших впадин на измеренной матрице  $Rz$  [19] и максимальной высоты профиля  $Rt$  (см. таблицу 1) выявил небольшое улучшение качества поверхности покрытия ПГ-СР2 после фрикционной обработки при нагрузке 350 Н по сравнению с качеством поверхности в шлифованном состоянии, несмотря на одинаковые значения  $Ra$  и  $Rq$  поверхностей после указанных обработок (см. табл. 1). Это связано с наличием на шлифованной поверхности борозд, ориентированных в направлении шлифовки (рис. 1б), так как при обработке абразивными инструментами формирование поверхностного микрорельефа связано с закономерностями удаления материала в зоне контакта [20]. В случае же

фрикционной обработки при нагрузке 350 Н выступы на поверхности выглаживаются (рис. 2а). Электрополированной поверхности соответствуют несколько большие значения указанных параметров, что, очевидно, связано с вытравливанием границ зерен при проведении электролитического полирования (рис. 1а). После фрикционной обработки при нагрузке 500 Н параметры шероховатости  $Rz$  и  $Rt$  существенно возрастают, на рис. 2б показана значительная разница между верхними и нижними точками профилограммы.

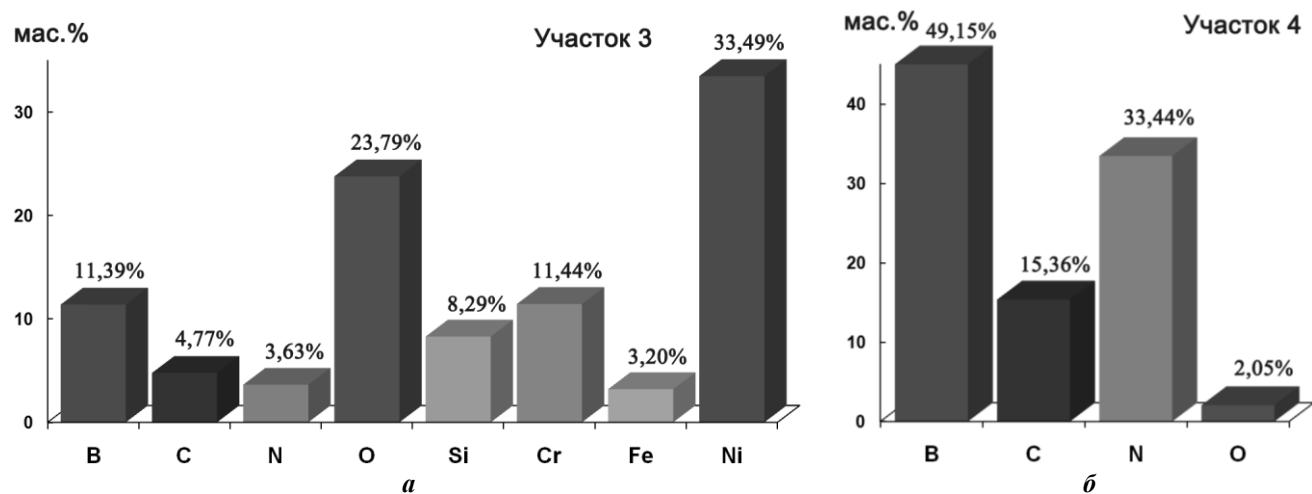
На рис. 3, 4 и 5 изображены изменения химического состава поверхности инденторов из мелкодисперсного кубического нитрида бора после фрикционной обработки покрытия ПГ-СР2 на воздухе при нагрузках  $P=350$  Н и  $P=500$  Н. На рис. 3 видно, что на рабочей поверхности индентора после деформационной обработки при нагрузке  $P=350$  Н появляется пятно контакта (участок 1). Однако по химическому составу указанный участок мало отличается от периферийного участка 2



**Рис. 3.** Поверхности (РЭМ) инденторов из DBN после фрикционной обработки покрытия ПГ-СР2 на воздухе при различных нагрузках: **а** –  $P=350\text{ H}$ ; **б** –  $P=500\text{ H}$



**Рис. 4.** Химический состав на поверхности индентора (мас. %) в участках 1 (а) и 2 (б), обозначенных на рис. 3а



**Рис. 5.** Химический состав на поверхности индентора (мас. %) в участках 3 (а) и 4 (б), обозначенных на рис. 3б

(рис. 4), не участвующего во фрикционном контакте с поверхностью покрытия: основу химического состава обоих участков 1 и 2 составляют бор и азот, из которых и состоит индентор из мелкодисперсного кубического нитрида бора. Следовательно, при фрикционной обработке индентором из DBN на воздухе при нагрузке  $P=350$  Н перенос материала хромоникелевого покрытия на поверхность индентора не происходит.

После фрикционной обработки при нагрузке  $P=500$  Н происходит массоперенос материала хромоникелевого покрытия на вершину индентора, о чем свидетельствуют результаты микрорентгеноспектрального анализа участка 3, на котором присутствуют в значительных количествах элементы Ni (33,49 мас. %), Cr (11,44 мас. %) и Si (8,29 мас. %) (см. рис. 3б, 5а), содержащиеся в NiCrBSi покрытии. При этом на периферийном участке 4 указанных элементов в химическом составе нет (см. рис. 3б, 5б). Массоперенос покрытия ПГ-СР2 на поверхность индентора из DBN в процессе фрикционной обработки на воздухе при нагрузке 500 Н приводит к возникновению в зоне деформационного контакта одноименной пары трения «ПГ-СР2 – ПГ-СР2» и способствует соответствующему росту коэффициента трения до  $f=0,33$  (по сравнению с коэффициентом трения  $f=0,25$  при фрикционной обработке с нагрузкой 350 Н).

Развитие процессов схватывания на поверхности покрытия в процессе фрикционной обработки с нагрузкой 500 Н препятствует накоплению деформации в поверхностном слое вследствие его ускоренного разрушения. Этим можно объяснить достижение меньшего уровня упрочнения поверхности покрытия (805 HV 0,025, см. табл. 1) при фрикционной обработке с нагрузкой 500 Н, чем при использовании нагрузки 350 Н (855 HV 0,025), когда на поверхности покрытия не происходят процессы схватывания и не происходит перенос материала покрытия на поверхность индентора.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Фрикционная обработка мелкодисперсным кубическим нитридом бора на воздухе поверхности покрытия ПГ-СР2 при нагрузках 350 Н и 500 Н приводит к повышению показателя средней микротвердости покрытия (до 805–855 HV 0,025) по сравнению со значениями показателя микротвердости покрытия в электрополированном (570 HV 0,025) или шлифованном (740 HV 0,025) состояниях.

Фрикционная обработка при нагрузке 350 Н формирует качественные поверхности со сниженными параметрами шероховатости  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ , равными соответствующим параметрам поверхности покрытия в шлифованном или электрополированном состояниях или более низкими параметрами. В процессе обработки покрытия ПГ-СР2 при нагрузке 500 Н интенсивно развиваются процессы схватывания, приводящие к формированию поверхности с повышенной шероховатостью.

Схватывание при фрикционной обработке с нагрузкой 500 Н приводит к массопереносу на поверхность вершины индентора материала покрытия и возникновению в зоне деформационного контакта одноименной пары трения «ПГ-СР2 – ПГ-СР2» и способствует соответствующему росту коэффициента трения до  $f=0,33$ . При обработке с нагрузкой 350 Н перенос материала

покрытия на поверхность индентора не происходит, и наблюдается меньший коэффициент трения ( $f=0,25$ ).

Развитие процессов схватывания на поверхности покрытия при фрикционной обработке с нагрузкой 500 Н препятствует накоплению деформации в поверхностном слое покрытия и соответствующему достижению его максимального упрочнения (855 HV 0,025), наблюдавшегося в результате обработки при нагрузке 350 Н, когда отсутствует перенос материала покрытия на поверхность индентора.

Таким образом, фрикционная обработка индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора на воздухе при нагрузке 350 Н является более предпочтительной по сравнению с обработкой при нагрузке 500 Н не только в связи с получением более прочной и качественной поверхности с пониженными значениями параметров шероховатости, но и в связи с отсутствием заметного влияния на индентор и, следовательно, большей его долговечностью в эксплуатационных условиях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ МК-391.2019.8 и в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № AAAA-A18-118020790147-4 и ИФМ УрО РАН по теме № AAAA-A18-118020190116-6. 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Brückner F., Lepski D. Laser Cladding // Springer Series in Materials Science. 2017. Vol. 119. P. 263–306.
- Gao W., Chang C., Li G., Xue Y., Wang J., Zhang Z., Lin X. Study on the laser cladding of FeCrNi coating // Optik. 2019. Vol. 178. P. 950–957.
- Tobar M.J., Álvares C., Amado J.V., Rodríguez G., Yáñez A. Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi–WC coatings on stainless steel // Surface and Coatings Technology. 2006. Vol. 200. P. 6313–6317.
- Tamanna N., Crouch R., Naher S. Progress in numerical simulation of the laser cladding process // Optics and Lasers in Engineering. 2019. Vol. 122. P. 151–163.
- d’Oliveira A.S.C.M., Vilar R., Feder C.G. High temperature behavior of plasma transferred arc and laser Co-based alloy coatings // Applied Surface Science. 2002. Vol. 201. P. 154–160.
- Li C., Zhang Q., Wang F., Deng P., Lu Q., Zhang Y., Li S., Ma P., Li W., Wang Y. Microstructure and wear behaviors of WC-Ni coatings fabricated by laser cladding under high frequency micro-vibration // Applied Surface Science. 2019. Vol. 485. P. 513–519.
- 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. P. 6854–6862.
- Guo Ch., Zhou J., Chen J., Zhao J., Yu Y., Zhou H. High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings // Wear. 2011. Vol. 270. P. 492–498.

9. 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. P. 301–307.
10. Singh R., Kumar D., Mishra S.K., Tiwari S.K. Laser cladding of Stellite 6 on stainless steel to enhance solid particle erosion and cavitation resistance // Surface and Coatings Technology. 2014. Vol. 351. P. 87–97.
11. Лоскутов В.В. Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
12. 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.
13. 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.
14. Скорынина П.А., Макаров А.В., Юровских А.С., Осинцева А.Л. Влияние температуры наноструктурирующей фрикционной обработки на структурно-фазовое состояние, упрочнение и качество поверхности аустенитной хромоникелевой стали // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017. № 3. С. 103–109.
15. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Псахье С.Г., Саврай Р.А., Малыгина И.Ю., Давыдова Н.А. Трибологические аспекты наноструктурирующего выглаживания конструкционных сталей // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 3. С. 14–30.
16. Smirnov S.V., Konovalov D.A., Kalashnikov S.T., Smirnova E. O. Studying the Adhesion Strength and Mechanical Properties of Coatings on Aluminum-Magnesium Alloy Samples // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2018. Vol. 5. P. 106–115.
17. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М.: Стандартинформ, 2018.
18. Зайцева А.О., Захарова Н.В. Параметры шероховатости в соответствии с требованиями международного стандарта // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 2. № 11. С. 83–84.
19. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. М.: Стандартинформ, 2019.
20. Богуцкий Б.В., Дзюбаба Р.Н., Новоселов Ю.К. Влияние технологических факторов на параметры шероховатости при обработке абразивными инструментами // Механики XXI веку. 2017. № 16. С. 33–37.
3. Tobar M.J., Álvares C., Amado J.V., Rodríguez G., Yáñez A. Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi–WC coatings on stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, pp. 6313–6317.
4. Tamanna N., Crouch R., Naher S. Progress in numerical simulation of the laser cladding process. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, vol. 122, pp. 151–163.
5. d’Oliveira A.S.C.M., Vilar R., Feder C.G. High temperature behavior of plasma transferred arc and laser Co-based alloy coatings. *Applied Surface Science*, 2002, vol. 201, pp. 154–160.
6. Li C., Zhang Q., Wang F., Deng P., Lu Q., Zhang Y., Li S., Ma P., Li W., Wang Y. Microstructure and wear behaviors of WC-Ni coatings fabricated by laser cladding under high frequency micro-vibration. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 485, pp. 513–519.
7. 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, pp. 6854–6862.
8. Guo Ch., Zhou J., Chen J., Zhao J., Yu Y., Zhou H. High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings. *Wear*, 2011, vol. 270, pp. 492–498.
9. 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, pp. 301–307.
10. Singh R., Kumar D., Mishra S.K., Tiwari S.K. Laser cladding of Stellite 6 on stainless steel to enhance solid particle erosion and cavitation resistance. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 351, pp. 87–97.
11. Loskutov V.V. *Shlifovanie metallov* [Metal grinding]. Moskow, Mashinostroenie Publ., 1985. 256 p.
12. Makarov A.V., Soboleva N.N., Savray 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.
13. 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.
14. Skorynina P.A., Makarov A.V., Yurovskikh A.S., Osintseva A.L. The influence of temperature of nanostructuring frictional treatment on the structural-phase state, hardening and surface quality of austenitic chromium-nickel steel. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 103–109.
15. Kuznetsov V.P., Makarov A.V., Psakhie S.G., Savrai R.A., Malygina I.Yu., Davydova N.A. Tribological aspects in nanostructuring burnishing of structural steels. *Physical mesomechanics*, 2014, vol. 17, no. 4, pp. 250–264.
16. Smirnov S.V., Konovalov D.A., Kalashnikov S.T., Smirnova E.O. Studying the Adhesion Strength and Mechanical Properties of Coatings on Aluminum-Magnesium Alloy Samples. *Diagnostics, Resource and*

## REFERENCES

1. Brückner F., Lepski D. *Laser Cladding. Springer Series in Materials Science*, 2017, vol. 119, pp. 263–306.
2. Gao W., Chang C., Li G., Xue Y., Wang J., Zhang Z., Lin X. Study on the laser cladding of FeCrNi coating. *Optik*, 2019, vol. 178, pp. 950–957.

3. Tobar M.J., Álvares C., Amado J.V., Rodríguez G., Yáñez A. Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi–WC coatings on stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 200, pp. 6313–6317.
4. Tamanna N., Crouch R., Naher S. Progress in numerical simulation of the laser cladding process. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, vol. 122, pp. 151–163.
5. d’Oliveira A.S.C.M., Vilar R., Feder C.G. High temperature behavior of plasma transferred arc and laser Co-based alloy coatings. *Applied Surface Science*, 2002, vol. 201, pp. 154–160.
6. Li C., Zhang Q., Wang F., Deng P., Lu Q., Zhang Y., Li S., Ma P., Li W., Wang Y. Microstructure and wear behaviors of WC-Ni coatings fabricated by laser cladding under high frequency micro-vibration. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 485, pp. 513–519.
7. 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, pp. 6854–6862.
8. Guo Ch., Zhou J., Chen J., Zhao J., Yu Y., Zhou H. High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings. *Wear*, 2011, vol. 270, pp. 492–498.
9. 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, pp. 301–307.
10. Singh R., Kumar D., Mishra S.K., Tiwari S.K. Laser cladding of Stellite 6 on stainless steel to enhance solid particle erosion and cavitation resistance. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 351, pp. 87–97.
11. Loskutov V.V. *Shlifovanie metallov* [Metal grinding]. Moskow, Mashinostroenie Publ., 1985. 256 p.
12. Makarov A.V., Soboleva N.N., Savray 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.
13. 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.
14. Skorynina P.A., Makarov A.V., Yurovskikh A.S., Osintseva A.L. The influence of temperature of nanostructuring frictional treatment on the structural-phase state, hardening and surface quality of austenitic chromium-nickel steel. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 103–109.
15. Kuznetsov V.P., Makarov A.V., Psakhie S.G., Savrai R.A., Malygina I.Yu., Davydova N.A. Tribological aspects in nanostructuring burnishing of structural steels. *Physical mesomechanics*, 2014, vol. 17, no. 4, pp. 250–264.
16. Smirnov S.V., Konovalov D.A., Kalashnikov S.T., Smirnova E.O. Studying the Adhesion Strength and Mechanical Properties of Coatings on Aluminum-Magnesium Alloy Samples. *Diagnostics, Resource and*

- Mechanics of materials and structures*, 2018, vol. 5, pp. 106–115.
17. GOST 2789-73. *Surface roughness. Parameters and characteristics*.
18. Zaitseva A.O., Zakharova N.V. The roughness parameters in accordance with the requirements of the international standard. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavtiki*, 2015, vol. 2, no. 11, pp. 83–84.
19. GOST R ISO 4287-2014. *Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters*.
20. Bogutsky B.V., Dzyubaba R.N., Novoselov Yu.K. The influence of technological factors on the parameters of surface roughness when working with abrasive tools. *Mekhaniki XXI veka*, 2017, no. 16, pp. 33–37.

## TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FRICTIONAL TREATMENT OF PG-SR2 COATING FORMED BY LASER CLADDING

© 2019

**N.N. Soboleva**, PhD (Engineering),

researcher of the Laboratory of Constructional Material Science

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

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

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

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

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

**I.Yu. Malygina**, PhD (Engineering),

senior researcher of the Laboratory of Constructional Material Science

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

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

**Abstract:** PG-SR2 powder having the Ni–Cr–B–Si alloying system is used for laser cladding on the parts operating in the conditions of wear, corrosion, erosion, and high temperatures. The extensive surface waviness and roughness resulting from laser cladding are currently eliminated by grinding with abrasive wheels. Previously, the authors showed the possibility of finishing frictional treatment of the PG-SR2 coating with an indenter made of finely dispersed cubic boron nitride in the air under the load of 350 N. However, an increase in the load on the indenter during frictional treatment can affect ambiguously. Besides, the state of the indenters after the frictional treatment of the PG-SR2 coating has not been previously considered, what is one of the important aspects of the selection of technological parameters of frictional treatment. Therefore, in the present work, the authors studied the hardness and quality of the PG-SR2 coating surface after the frictional treatment under the loads on the indenter of 350 and 500 N, compared with the surface characteristics after the electro-polishing and grinding, and analyzed the surfaces of the indenters after such treatments. The study showed that during frictional treatment under the load of 500 N, the processes of setting occur on the PG-SR2 coating surface leading to the formation of a surface with the increased roughness and preventing the maximum strain hardening of the coating. This causes the transfer of the coating material to the surface of the indenter tip. Chemical composition on the indenter surface after the frictional treatment under the load of 350 N does not change. Moreover, such treatment forms the hardest and high-quality surface with the reduced roughness parameters and can be recommended as a finishing hardening operation for producing parts with the PG-SR2 coating.