



# УПРОЧНЯЮЩАЯ ФРИКЦИОННАЯ ОБРАБОТКА NiCrBSi ЛАЗЕРНОГО ПОКРЫТИЯ\*

*Н.Н. СОБОЛЕВА*

*А.В. МАКАРОВ, доктор техн. наук*

*ст. науч. сотрудник*

*И.Ю. МАЛЫГИНА, канд. техн. наук*

*(ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург)*

Поступила 6 сентября 2013

Рецензирование 5 ноября 2013

Принята к печати 15 ноября 2013

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

Изучено влияние технологических параметров фрикционной обработки (материал индентора, смазочно-охлаждающая технологическая среда, нагрузка и коэффициент трения) на фазовый состав, шероховатость и микротвердость поверхности хромоникелевого покрытия ПГ-СР2, полученного газопорошковой лазерной наплавкой. Установлено эффективное упрочнение поверхности покрытия ПГ-СР2 фрикционной обработкой инденторами из нитрида бора на воздухе и из твердого сплава в аргоне при относительно высоких коэффициентах трения в паре «индентор–покрытие» при одновременном обеспечении благоприятного напряженного состояния поверхностного слоя и высокой чистоты обработки поверхности. Показано, что фрикционная обработка способствует росту износостойкости поверхности покрытия при испытании по закрепленному абразиву (кремень), а также в условиях адгезионного изнашивания (при сухом трении скольжения).

**Ключевые слова:** лазерная наплавка, фрикционная обработка, NiCrBSi, микротвердость, абразивное изнашивание, адгезионное изнашивание.

## Введение

Износостойкие хромоникелевые покрытия обладают высокой эксплуатационной стойкостью в условиях абразивного изнашивания, коррозии и высоких температур [1–4]. Среди различных методов получения износостойких покрытий несомненное преимущество имеет лазерная наплавка, в процессе которой тонкий поверхностный слой основного металла оплавляется лазерным лучом совместно с присадочным материалом [5]. Лазерную наплавку характеризует высокая скорость охлаждения за счет локальности нагрева и интенсивного теплоотвода в глубь детали, возможность выборочной наплавки небольшой области детали и др. [6]. Лазерная наплавка обеспечивает хорошее металлургическое сцепление

и низкое коробление деталей [7]. Однако наплавленные слои характеризуются значительной волнистостью и шероховатостью поверхности, что устраняется, как правило, шлифованием абразивными кругами. При этом в результате шлифования в поверхностном слое деталей формируются опасные растягивающие напряжения, а на поверхности возможно появление «прижогов» и микротрещин.

Применение технологии интенсивного поверхностного пластического деформирования (ИППД) в качестве финишной обработки покрытий позволяет устранить многие недостатки шлифования, обеспечив одновременно дополнительное повышение прочностных и трибологических свойств, формирование благоприятных сжимающих напряжений, а также низкую шероховатость поверхности. Перспективным

\* Работа выполнена при частичной поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект № 12-Т-1-1010 по программе ОЭММПУ РАН № 12 и проект №12-П-1-1027 по программе Президиума РАН № 25. Исследования проведены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

представляется использование в качестве финишной обработки хромоникелевых лазерных покрытий такого способа ИППД, как фрикционная обработка скользящими инденторами [8].

В настоящей работе рассматривается возможность достижения дополнительного повышения твердости и износостойкости хромоникелевых лазерных наплавов при одновременном обеспечении благоприятного напряженного состояния поверхностного слоя и высокой чистоты обработки поверхности за счет оптимизации технологических параметров фрикционной обработки.

### Методика экспериментального исследования

Материалом для покрытий выбран порошок марки ПГ-СР2 (0,48% С; 14,8% Cr; 2,6% Fe; 2,9% Si; 2,1% В; остальное – Ni). Наплавку порошков на пластины из стали Ст3 проводили непрерывным CO<sub>2</sub>-лазером при мощности излучения 1,4...1,6 кВт, скорости 160 мм/мин, расходе порошка 2,9...3,8 г/мин, размере лазерного пятна на поверхности 6×1,5 мм. Для уменьшения поверхностных напряжений наплавка осуществлялась в два прохода путем наложения одного слоя на другой.

Перед проведением фрикционной обработки проводилась ручная механическая полировка образца, а затем электролитическим полированием в уксусно-хромовом электролите (90 об. % CH<sub>3</sub>COOH, 10 об. % H<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>) удалялся слой покрытия толщиной 30 мкм.

Фрикционную обработку проводили сферическими инденторами из мелкодисперсного кубического нитрида бора, вольфрамо-кобальтового твердого сплава ВК-8 и природного алмаза в различных смазочно-охлаждающих технологических средах СОТС (смазочно-охлаждающей жидкости СОЖ, окислительной воздушной среде и безокислительной среде аргона). Фрикционную обработку осуществляли при пятикратном сканировании инденторами плоских наплавленных поверхностей со средней скоростью 0,013 м/с, длине хода 18 мм, смещении индентора на 0,1 мм на двойной ход.

Структуру и фазовый состав покрытий изучали с применением сканирующего электронного микроскопа VEGA II XMU и рентгеновского дифрактометра SHIMADZU XRD-7000. Микротвердость измеряли на микротвердомере Wilson & Wolpert 402 MVD при нагрузке 0,245 Н на индентор Виккерса. Шероховатость

поверхности исследовали на оптическом интерферометрическом профилометре Wyko NT-1100.

Испытания на абразивное изнашивание проводили при скольжении торцевых поверхностей (7×7 мм) наплавленных образцов по закрепленному абразиву – кремню зернистостью 200 мкм со средней скоростью 0,175 м/с, при нагрузке 49 Н, поперечном смещении образца за один двойной ход 1,2 мм, пути трения 18 м. Испытания в условиях трения скольжения проводили при возвратно-поступательном движении торцевой поверхности образца по пластине из стали Х12М (62-64 HRCэ) на воздухе при нагрузке 294 Н средней скорости скольжения 0,07 м/с, длине рабочего хода 40 мм и различном пути трения. Коэффициент трения определяли как отношение силы трения к нормальной нагрузке  $f = F/N$ , где  $F$  – сила трения, Н;  $N$  – нормальная нагрузка, Н. Интенсивность изнашивания рассчитывали по формуле  $Ih = Q/(\rho SL)$ , где  $Q$  – потери массы образца, г;  $\rho$  – плотность материала, г/см<sup>3</sup>;  $S$  – геометрическая площадь контакта, см<sup>2</sup>;  $L$  – путь трения, см. Для расчета удельной работы абразивного изнашивания использовалась формула  $W = fNL\rho/Q$ .

### Результаты и обсуждение

В результате газопорошковой лазерной наплавки на поверхности стальных пластин формировались покрытия, по всей толщине (0,6...1,0 мм) которых наблюдалось достаточно равномерное распределение основных структурных составляющих. По данным рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального методов анализа (рис. 1) металлическую основу покрытия ПГ-СР2 составляет эвтектика, представляющая собой  $\gamma$ -твердый раствор на основе никеля и Ni<sub>3</sub>B. Упрочняющей карбидной фазой покрытия являются дисперсные карбиды хрома типа Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, имеющие микротвердость 9,9...11,3 ГПа.

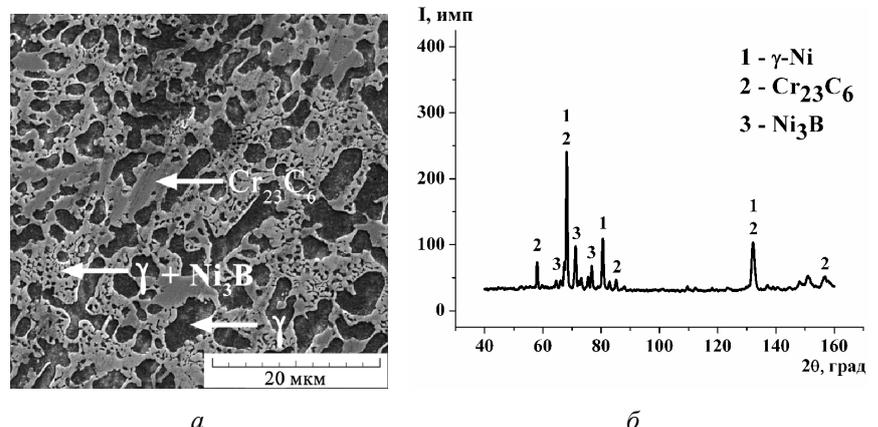


Рис. 1. Микроструктура и рентгеновская дифрактограмма покрытия ПГ-СР2 после лазерной наплавки

Фрикционная обработка электролитически полированной поверхности покрытия ПГ-СР2 инденторами из мелкодисперсного кубического нитрида бора, природного алмаза и твердого сплава ВК-8 во всех исследованных смазочно-охлаждающих технологических средах (жидкой – СОЖ, воздух, аргон) при нормальной нагрузке на индентор  $P = 350$  Н, а также при обработке всеми указанными инденторами в СОЖ при нагрузке  $P = 1000$  Н формирует более качественные поверхности покрытия ПГ-СР2 (со средними параметрами шероховатости  $Ra = 25...80$  нм) по сравнению с исходной электролитически полированной поверхностью ( $Ra = 255$  нм) и поверхностью после шлифовки абразивным кругом на плоскошлифовальном станке ( $Ra = 135$  нм) (табл. 1, рис. 2, а–в).

При этом наиболее эффективное упрочнение на поверхности покрытия достигается фрикционной обработкой инденторами из мелкодисперсного нитрида бора на воздухе ( $HV_{0,025} = 855$ ) и из твердого сплава в аргоне ( $HV_{0,025} = 800$ ) (при микротвердости после электрополировки  $HV_{0,025} = 570$  и шлифовки на станке  $HV_{0,025} = 740$ ) при относительно высоких коэффициентах трения ( $f = 0,23...0,25$ ) в паре «индентор–покрытие» (см. табл. 1), способствующих накоплению деформаций в поверхностном слое [9, 10].

При фрикционной обработке инденторами из тридцати бора и твердого сплава в газовых средах при увеличенной нагрузке ( $P = 500$  Н) и коэффициентах трения ( $f = 0,33...0,39$ ) также достигается значительное упрочнение поверхности покрытия (до  $HV_{0,025} = 785...885$ ), однако при этом на поверхности покрытия в процессе фрикционной обработки интенсивно развиваются процессы схватывания (рис. 2, з) и формируются поверхности с высокой шероховатостью (средние значения  $Ra = 300...505$  нм) (см. табл. 1).

Исследованием на сканирующем электронном микроскопе поперечных шлифов образцов с лазерной наплавкой ПГ-СР2 после фрикционной обработки индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора на воздухе при нагрузке 350 Н установлено формирование сильно диспергированного поверхностного слоя толщиной 5...7 мкм (рис. 3). Фрикционная обработка создает на поверхности рассматриваемых наплавленных покрытий упрочненный градиентный слой с максимальной микротвердостью непосредственно на поверхности образцов. При этом по данным измерений микротвердости при последовательном электролитическом удалении поверхностного слоя общая толщина упрочненного фрикционной обработкой слоя у покрытия ПГ-СР2 достигает 100 мкм.

Таблица 1

**Влияние электролитического полирования, шлифования и фрикционной обработки с различными технологическими параметрами (материал индентора, смазочно-охлаждающая технологическая среда СОТС, нагрузка  $P$  и коэффициент трения  $f$ ) на среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$  и микротвердость  $HV_{0,025}$  поверхности покрытия ПГ-СР2**

Состояние образца, материал индентора	Параметры фрикционной обработки			Ra, нм	HV 0,025
	СОТС	$P$ , Н	$f$		
Исходное (электрополировка)	–	–	–	255	570
Шлифовка на станке	–	–	–	135	740
Фрикционная обработка индентором из алмаза	СОЖ	1000	0,08	85	790
	Аргон	350	0,06	25	755
Фрикционная обработка индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора	СОЖ	350	0,11	50	710
		1000	0,11	50	710
	Воздух	350	0,25	60	855
		500	0,33	505*	805
	Аргон	500	0,35	300*	885
Фрикционная обработка индентором из твердого сплава ВК-8	СОЖ	1000	0,11	70	650
	Воздух	350	0,21	40	730
		500	0,38	380*	830
	Аргон	350	0,23	60	800
		500	0,39	445*	785

\* Режим схватывания

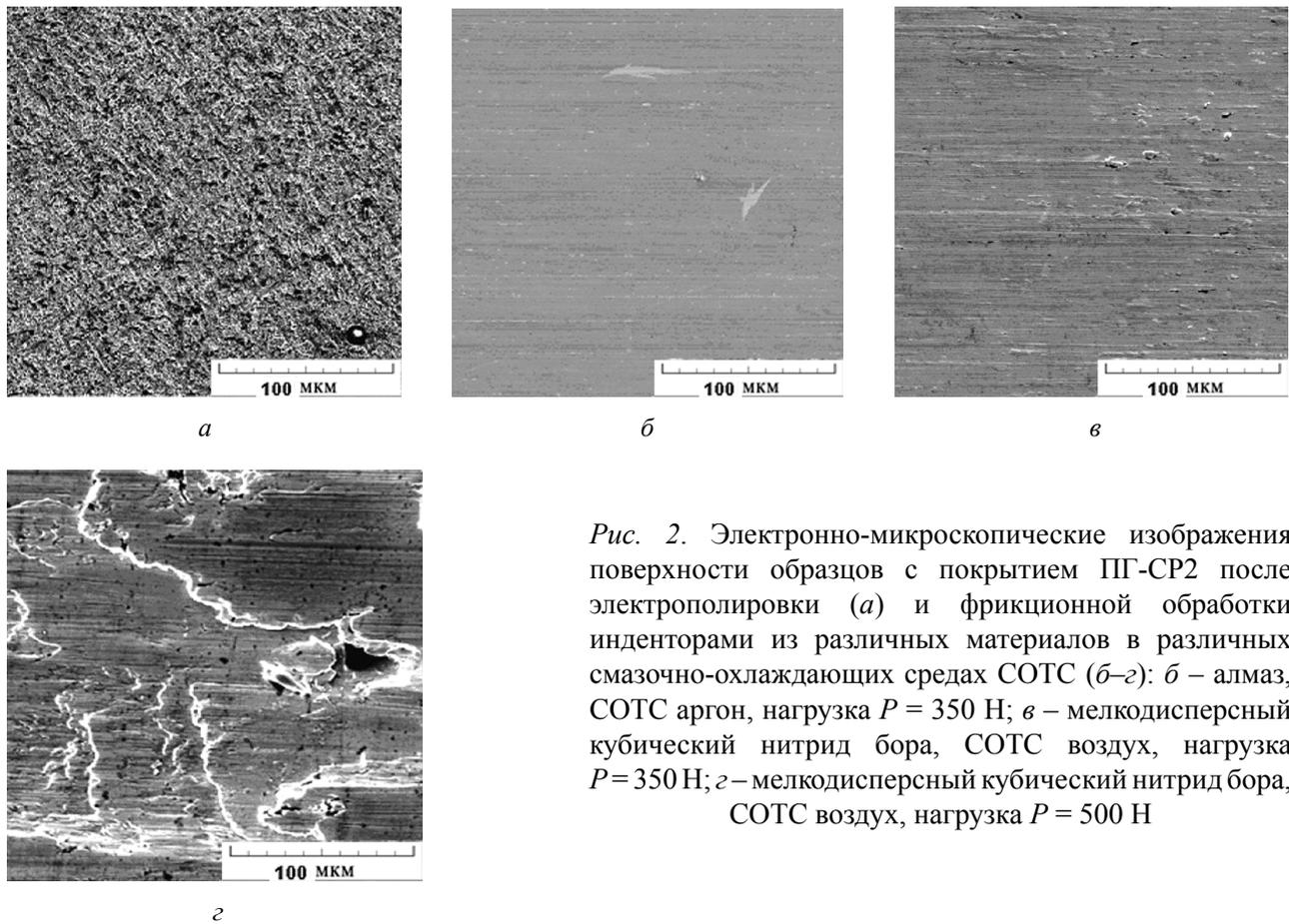


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения поверхности образцов с покрытием ПГ-CP2 после электрополировки (а) и фрикционной обработки инденторами из различных материалов в различных смазочно-охлаждающих средах СОТС (б-з): б – алмаз, СОТС аргон, нагрузка  $P = 350$  Н; в – мелкодисперсный кубический нитрид бора, СОТС воздух, нагрузка  $P = 350$  Н; з – мелкодисперсный кубический нитрид бора, СОТС воздух, нагрузка  $P = 500$  Н

Рис. 3, б и в показывают, что в тонком поверхностном слое покрытия в процессе фрикционной обработки происходит деформационное растворение частиц  $Ni_3B$ , а также частичное растворение карбидов  $Cr_{23}C_6$ , о чем свидетельствует уменьшение интенсивности соответствующих линий на рентгеновской дифрактограмме (по сравнению с рис. 1, б). Деформационному растворению боридов и карбидов способствует развитие в поверхностном слое под

действием трения (при фрикционной обработке) ротационной пластичности металла [8].

После фрикционной обработки на поверхности покрытия зафиксированы сжимающие остаточные напряжения ( $\sigma = -400$  МПа).

Согласно данным табл. 2 фрикционная обработка поверхности покрытия ПГ-CP2 индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора на воздухе не только повышает микротвердость, но и способствует росту на 20 % износостойкости (что проявляется в

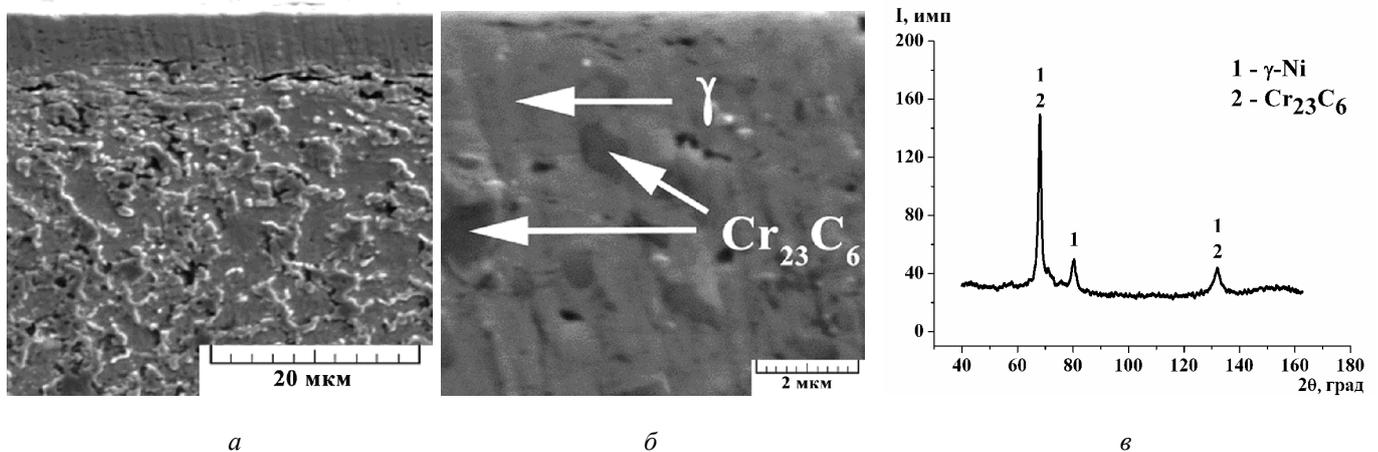


Рис. 3. Микроструктура поперечного шлифа (а, б) и рентгеновская дифрактограмма поверхности (в) покрытия ПГ-CP2 после фрикционной обработки индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора на воздухе при нагрузке  $P = 350$  Н

**Влияние фрикционной обработки покрытия ПГ-СР2 индентором из мелкодисперсного нитрида бора на воздухе при нагрузке 350 Н на микротвердость HV0,025, интенсивность изнашивания  $Ih$ , коэффициент трения  $f$  и удельную работу изнашивания  $W$  при испытании по кремнию**

Состояние образца	HV0,025	$Ih, 10^{-5}$	$f$	$W, \text{Дж/см}^3$
Исходное (электрополировка)	570	1,05	0,45	42,6
Фрикционная обработка	855	0,85	0,43	50,8

снижении интенсивности абразивного изнашивания) и удельной работы изнашивания при испытании по закрепленному абразиву кремнию.

Фрикционная обработка покрытия обеспечивает также существенное (до 4 раз) снижение интенсивности изнашивания (рис. 4) в условиях адгезионного изнашивания (при сухом трении скольжения). Рост

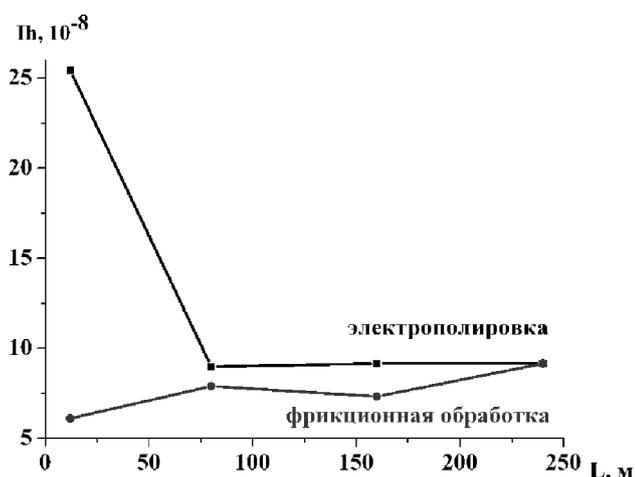


Рис. 4. Изменение интенсивности изнашивания  $Ih$  на пути трения  $L$  при испытаниях на сухое трение скольжения по пластине из стали X12M покрытия ПГ-СР2 в исходном электрополированном состоянии и после фрикционной обработки индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора на воздухе при нагрузке  $P = 350 \text{ Н}$

износостойкости связан с тем, что сильное диспергирование структуры и упрочнение покрытия фрикционной обработкой приводят к устранению периода приработки, при которой происходит наиболее интенсивное изнашивание, а также к замедлению разрушения материала в период его установившегося изнашивания.

### Выводы

Экспериментально установлено, что фрикционная обработка скользящими полусферическими инденторами из различных твердых материалов (мелкодисперсный кубический нитрид бора, твердый

сплав ВК-8, 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  $Ra = 25 \dots 80 \text{ нм}$  и рост микротвердости покрытия. При этом наиболее эффективное упрочнение на поверхности покрытия ПГ-СР2 достигается фрикционной обработкой инденторами из кубического нитрида бора на воздухе ( $HV0,025 = 855$ ) и из твердого сплава в аргоне ( $HV0,025 = 800$ ) при относительно высоких коэффициентах трения в паре «индентор–покрытие» ( $f = 0,23 \dots 0,25$ ).

Показано, что фрикционная обработка покрытия ПГ-СР2 индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора на воздухе при нагрузке 350 Н формирует сильно диспергированный поверхностный слой толщиной 5...7 мкм при общей толщине упрочненного слоя до 100 мкм, в котором происходит деформационное растворение частиц  $Ni_3B$ , а также частичное растворение карбидов  $Cr_{23}C_6$ . Слой характеризуется повышенным уровнем благоприятных сжимающих остаточных напряжений ( $-400 \text{ МПа}$ ). Фрикционная обработка повышает на 20 % износостойкость и удельную работу изнашивания покрытия при испытании по закрепленному абразиву кремнию, а также обеспечивает существенное (до 4 раз) снижение интенсивности адгезионного изнашивания вследствие ограничения периода приработки.

### Список литература

1. González R., Cadenas M., Fernández R. et al. Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser // *Wear*. – 2007. – Vol. 262. – P. 301–307.
2. Miguel J.M., Guilemany J.M., Vizcaino S. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes // *Tribology International*. – 2003. – Vol. 36. – P. 181–187.
3. Sari N.J., Yilmaz M. Improvement of wear resistance of wire drawing rolls with Cr-Ni-B-Si+WC thermal spraying powders // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P. 3136–3141.

4. *Rodríguez J., Martín A., Fernández R., Fernández J.E.* An experimental study of wear performance of NiCrBSi thermal spray coatings // *Wear.* – 2003. – Vol. 255. – P. 950–955.

5. *Tobar M.J., Álvarez C., Amado J.M. et al.* Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi=WC coatings on stainless steel // *Surface and Coatings Technology.* – 2006. – Vol. 200. – P. 6313–6317.

6. *Huang S.W., Samandi M., Brandt M.* Abrasive wear performance and microstructure of laser clad WC/Ni layers // *Wear.* – 2004. – Vol. 256. – P. 1095–1105.

7. *Ming Q., Lim L.C., Chen Z.D.* Laser cladding of nickel-based hardfacing alloys // *Surface and Coatings Technology.* – 1998. – Vol. 106. – P. 174–182.

8. *Макаров А.В.* Наноструктурирующая фрикционная обработка углеродистых и низколегированных

сталей // Перспективные материалы: учеб. пособие / под ред. Д.Л. Мерсона: – Тольятти: ТГУ. – 2011. – 434 с. – Т. IV, гл. 3. – С. 123–208.

9. *Makarov A.V., Savrai R.A., Pozdejeva N.A. et al.* Effect of hardening friction treatment with hard-alloy indenter on microstructure, mechanical properties, and deformation and fracture features of constructional steel under static and cyclic tension // *Surface and Coatings Technology.* – 2010. – Vol. 205, №. 3. – P. 841–852.

10. *Вичужанин Д.И., Макаров А.В., Смирнов С.В., Поздеева Н.А., Малыгина И.Ю.* Напряженно-деформированное состояние и поврежденность при фрикционной упрочняющей обработке плоской стальной поверхности скользящим цилиндрическим индентором // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* – 2011. – № 6. – С. 61–69.

## Obrabotka metallov

N 4(61), October–December 2013, Pages 79-85

### Hardening frictional treatment of NiCrBSi laser clad coating

N.N. Soboleva, A.V. Makarov, I.Yu. Malygina

Institute of Engineering Science Ural Branch of Russian Academy of Sciences,  
Komsomolskaya st., 34,  
Ekaterinburg, 620049, Russia

E-mail: natashasoboleva@list.ru

Received 6 September 2013

Revised 5 November 2013

Accepted 15 November 2013

#### Abstract

The influence of technological parameters of a friction treatment (indenter material, coolant-cutting processing medium, friction load and friction coefficient) on the phase composition, surface roughness and microhardness of chromium-nickel PG- SR2 coating, produced by gas-powder laser cladding is studied. The efficiency of the coating surface hardening of the PG- SR2 coating by the indenters of boron nitride in the air and solid carbide in argon at a relatively high friction coefficient “indenter - coating” while ensuring a favorable stress state of the surface layer and high surface finish is determined. It is shown that the friction treatment promotes increase of coating surface durability during tests on fixed abrasive (flint) and on adhesive wear (in dry sliding friction).

Keywords: Laser cladding; Frictional treatment; Microhardness; Abrasive wear; Adhesive wear.

## References

1. González R., Cadenas M., Fernández R. et al. Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser. *Wear.* 2007, Vol. 262, pp. 301–307.

2. Miguel J.M., Guilemany J.M., Vizcaino S. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes. *Tribology International*. 2003, Vol. 36, pp. 181–187.
3. Sari N.J., Yilmaz M. Improvement of wear resistance of wire drawing rolls with Cr-Ni-B-Si+WC thermal spraying powders. *Surface and Coatings Technology*. 2008, Vol. 202, pp. 3136–3141.
4. Rodríguez J., Martín A., Fernández R., Fernández J.E. An experimental study of wear performance of NiCrBSi thermal spray coatings. *Wear*. 2003, Vol. 255, pp. 950–955.
5. Tobar M.J., Álvarez C., Amado J.M. et al. Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi=WC coatings on stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. 2006, Vol. 200, pp. 6313–6317.
6. Huang S.W., Samandi M., Brandt M. Abrasive wear performance and microstructure of laser clad WC/Ni layers. *Wear*. 2004, Vol. 256, pp. 1095–1105.
7. Ming Q., Lim L.C., Chen Z.D. Laser cladding of nickel-based hardfacing alloys. *Surface and Coatings Technology*. 1998, Vol. 106, pp. 174–182.
8. Makarov A.V. *Nanostrukturirujushhaja frikcionnaja obrabotka uglerodistyh i nizkolegированных сталей* [Nanostructured friction processing carbon and alloy steels]. *Perspektivnye materialy. Struktura i metody issledovaniya: Uchebnoe posobie dlja studentov vuzov napravlenij "Fizicheskoe materialovedenie" i "Metallurgija"* [Advanced materials. Structure and Methods: Tutorial for students of directions "Physical Materials" and "Metallurgy"]. Pod red. D.L. Mersona. Moscow, MISiS; Togliatti, TSU, 2011, Vol. 4, Chapter 3, pp. 123–208. (434 p.)
9. Makarov A.V., Savrai R.A., Pozdejeva N.A. et al. Effect of hardening friction treatment with hard-alloy indenter on microstructure, mechanical properties, and deformation and fracture features of constructional steel under static and cyclic tension. *Surface and Coatings Technology*. 2010, Vol. 205, no. 3, pp. 841–852.
10. Vichuzhanin D.I., Makarov A.V., Smirnov S.V., Pozdeeva N.A., Malygina I.Yu. Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie i povrezhdennost' pri frikcionnoj uprochnjajushhej obrabotke ploskoj stal'noj poverhnosti skol'zjashhim cilindricheskim indentorom [Stress and strain and damage during frictional strengthening treatment of flat steel surface with a sliding cylindrical indenter]. *Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin - Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2011, no. 6, pp. 61–69.