



Received: 31.07.2022
Revised: 31.08.2022
Accepted: 30.09.2022
DOI: 10.17804/2410-9908.2022.5.050-059

THE EFFECT OF THE MULTIPLICITY OF FRICTIONAL ACTION ON THE MICROMECHANICAL PROPERTIES OF NiCrBSi-COATINGS

N. N. Soboleva^{1, a)*}, N. A. Davydova^{1, b)}, and A. V. Makarov^{1, 2, c)}

¹*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation*

²*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620108, Russian Federation*

a)  <https://orcid.org/0000-0002-7598-2980>  natashasoboleva@list.ru;
b)  <https://orcid.org/0000-0003-4894-9445>  davydova@imach.uran.ru;
c)  <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>  av-mak@yandex.ru

*Corresponding author. E-mail: natashasoboleva@list.ru

Address for correspondence: 34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation
Tel.: +7 (343) 362 30 33

The paper investigates the effect of the number of passes (1 or 2) of an indenter made of fine cubic boron nitride during friction treatment of PG-SR2 and PG-10N-01 NiCrBSi-coatings on the micromechanical properties of their surface layers. The friction treatment of the coating surface under all the process conditions studied, in comparison with the initial polished state, increases the strength characteristics of the coating surface layer and the parameters indicating the resistance of the material surface to elastic-plastic deformation. The effect of the number of indenter passes during surface friction treatment on the strength characteristics is found to be more significant for the softer and more ductile PG-SR2 coating than for the PG-10N-01 coating. This is attributed to the higher strain hardenability of the former.

Keywords: laser cladding, NiCrBSi-coatings, friction treatment, micromechanical properties.

Acknowledgment

The work was performed according to the state assignments for the IES UB RAS, theme No. AAAA-A18-118020790148-1, and for the IMP UB RAS, theme No. AAAA-A18-118020190116-6. The experimental research was performed in the Plastometriya shared research facilities of the IES UB RAS.

References

1. Kazamer N., Muntean R., Văliant P.C., Pascal D.T., Mărginean G., Șerban V.-A. Comparison of Ni-Based Self-Fluxing Remelted Coatings for Wear and Corrosion Applications. *Materials*, 2021, vol. 14, No. 12, 3293. DOI: 10.3390/ma14123293.
2. Liu X., Hu K., Zhang S., Xu T., Chen L., Byon E., Liu D. Study of KCl-induced hot corrosion behavior of high velocity oxy-fuel sprayed NiCrAlY and NiCrBSi-coatings deposited on 12CrMoV boiler steel at 700 °C. *Corrosion Science*, 2022, vol. 203, 110351. DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110351.
3. Kalyankar V.D., Wanare S.P. Comparative Investigations on Microstructure and Slurry Abrasive Wear Resistance of NiCrBSi and NiCrBSi-WC Composite Hardfacings Deposited on 304 Stainless Steel. *Tribology in Industry*, 2022, vol. 22, No. 2, pp. 199–211. DOI: 10.24874/ti.1075.03.21.05.

4. Soboleva N.N., Makarov A.V. Effect of Conditions of High-Temperature Treatment on the Structure and Tribological Properties of Nickel-Based Laser-Clad Coating. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2021, vol. 62, pp. 682–691. DOI: 10.3103/S1067821221060183.
5. Li W., Li J., Xu Y. Optimization of Corrosion Wear Resistance of the NiCrBSi Laser-Clad Coatings Fabricated on Ti6Al4V. *Coatings*, 2021, vol. 11, No. 8, 960. DOI: 10.3390/coatings11080960.
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. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.04.245.
7. 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. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.04.008.
8. Chaudhari A., Awale A.S., Yusufzai M.Z.K., Vashista M. Effect of Grinding Environments on Magnetic Response of AISI D2 Tool Steel. *Russian Journal of Non-destructive Testing*, 2021, vol. 57, No. 3, pp. 212–221. DOI: 10.1134/S1061830921030062.
9. Makarov A.V., Soboleva N.N., Savrai R.A., Malygina I.Yu. Improving the micromechanical properties and wear resistance of nickel-chromium laser clad coating using finishing frictional treatment. *Vektor nauki Tol'yattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 4, pp. 60–67. (In Russian). DOI: 10.18323/2073-5073-2015-4-60-67.
10. Soboleva N.N., Makarov A.V., Malygina I.Y., Savrai R.A. Wear resistance of a laser-clad NiCrBSi-coating hardened by frictional finishing. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1785, 030028. DOI: 10.1063/1.4967049.
11. Makarov A.V., Soboleva N.N., Malygina I.Y. Thermal stability of a laser-clad NiCrBSi-coating hardened by frictional finishing. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1915, 030012. DOI: 10.1063/1.5017332.
12. Soboleva N.N., Makarov A.V., Malygina I.Yu. Method of hardening nickel-chrome-boron-silicon coating on metal. *Patent RF 2709550*. 2019.
13. 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. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.02.021.
14. Smirnov S.V., Veretennikova I.A., Smirnova E.O., Pestov A.V. Estimating the effect of fillers on the mechanical properties of epoxy glue coatings by microindentation. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, iss. 6, pp. 103–111. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.103-111. Available at: http://dream-journal.org/DREAM_Issue_6_2017_Smirnov_S.V._et_al._103_111.pdf
15. ISO 14577–1:2002. Metallic materials Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Test method: part 1, 2002.
16. Oliver W.C., Pharr J.M. Improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 1992, vol. 7, iss. 6, pp. 1564–1583.
17. 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. DOI: 10.1016/0257-8972(93)90226-E.
18. 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. DOI: 10.1063/1.121873.
19. 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 Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Tsvetnaya Metallurgiya*, 2005, No. 6, pp. 62–69. (In Russian).
20. 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. DOI: 10.1134/S1063774507060065.

21. 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 innovacii*, 2010, vol. 6, No 5, pp. 7–18. (In Russian). DOI: 10.15407/scin6.05.07.

Подана в журнал: 31.07.2022
УДК 621.791.92:621.793.09
DOI: 10.17804/2410-9908.2022.5.050-059

ВЛИЯНИЕ КРАТНОСТИ ФРИКЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА NiCrBSi-ПОКРЫТИЙ

Н. Н. Соболева^{1, а)*}, Н. А. Давыдова^{1, б)}, А. В. Макаров^{1, 2, в)}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
д. 34, ул. Комсомольская, Екатеринбург, Российская Федерация

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
д. 18, ул. С. Ковалевской, Екатеринбург, Российская Федерация

^{а)}  <https://orcid.org/0000-0002-7598-2980>  natashasoboleva@list.ru;

^{б)}  <https://orcid.org/0000-0003-4894-9445>  davydova@imach.uran.ru;

^{в)}  <https://orcid.org/0000-0002-2228-0643>  av-mak@yandex.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: natashasoboleva@list.ru
Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, Российская Федерация
Тел.: +7 (343) 362–30–33

В работе исследовано влияние кратности (количество сканирований поверхности индентором: 1, 2) воздействия индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора при фрикционной обработке NiCrBSi-покрытий марок ПГ-CP2 и ПГ-10Н-01 на микромеханические свойства их поверхностных слоев. Фрикционная обработка поверхности покрытий при всех рассмотренных технологических режимах по сравнению с исходным полированным состоянием привела к росту прочностных характеристик поверхностного слоя покрытий, а также параметров, свидетельствующих о сопротивлении поверхности материалов упруго-пластическому деформированию. Для более мягкого и пластичного покрытия ПГ-CP2 установлено более существенное (в сравнении с покрытием ПГ-10Н-01) влияние количества сканирований поверхности индентором при фрикционной обработке на его прочностные характеристики, что связано с его лучшей способностью к деформационному упрочнению.

Ключевые слова: лазерная наплавка, NiCrBSi-покрытия, фрикционная обработка, микромеханические свойства.

1. Введение

NiCrBSi-покрытия характеризуются высокими показателями износо- и коррозионной стойкости [1–3], поэтому находят применение как для восстановления поверхностей изделий, бывших в эксплуатации, так и для улучшения эксплуатационных характеристик поверхностей новых изделий. Современным способом формирования NiCrBSi-покрытий является лазерная наплавка [4, 5]. Лазерная наплавка позволяет создавать покрытия с повышенной твердостью и однородностью, а также с отличным сцеплением с подложкой [6]. Покрытия после лазерной наплавки обладают существенной волнистостью и шероховатостью [7] поэтому зачастую перед вводом изделия в эксплуатацию требуется выполнение операции шлифовки/полировки. Однако шлифовка имеет некоторые недостатки, в частности, после ее выполнения возможно появление микротрещин, изменение физических и химических свойств поверхности [8].

Ранее авторы отмечали возможность применения фрикционной обработки скользящими инденторами в качестве финишной операции обработки NiCrBSi-покрытий, сформи-

рованных лазерной наплавкой [9–12]. Обработку проводили для наплавленных из порошков марок ПГ-CP2 и ПГ-10Н-01-покрытий при пятикратном сканировании их поверхности индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора. В случае применения фрикционной обработки в производственных условиях каждое дополнительное сканирование поверхности индентором означает кратное увеличение операционного времени. Однако характеристики поверхности изделий с NiCrBSi-покрытиями после фрикционной обработки при меньшем количестве сканирований поверхности индентором ранее не были рассмотрены.

Одним из современных способов анализа механических свойств NiCrBSi-покрытий является инструментальное микроиндентирование [13], позволяющее осуществлять запись диаграмм в процессе нагружения и разгрузки индентора. Микроиндентирование позволяет оценить механические свойства материалов, для которых нет возможности провести стандартные испытания на растяжение, сжатие и изгиб [14].

Цель работы – оценка микромеханических свойств поверхностного слоя NiCrBSi-покрытий после фрикционной обработки при одно- и двукратном воздействии индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора.

2. Материал и методика эксперимента

Фрикционная обработка проводилась на поверхности покрытий, полученных наплавкой CO₂-лазером порошков марок ПГ-CP2 и ПГ-10Н-01 на пластины из стали Ст3. Состав порошка ПГ-CP2 был следующим: Ni – основа; Cr – 14,8 мас. %; В – 2,1 мас. %; Si – 2,9 мас. %; С – 0,48 мас. %; Fe – 2,6 мас. %. Состав порошка ПГ-10Н-01: Ni – основа; Cr – 18,2 мас. %; В – 3,3 мас. %; Si – 4,2 мас. %; С – 0,92 мас. %; Fe – 2,6 мас. %. Наплавку проводили в два прохода, далее осуществляли шлифовку на станке и ручную полировку поверхности покрытий. Их толщина после этих операций составила 0,7–0,8 мм.

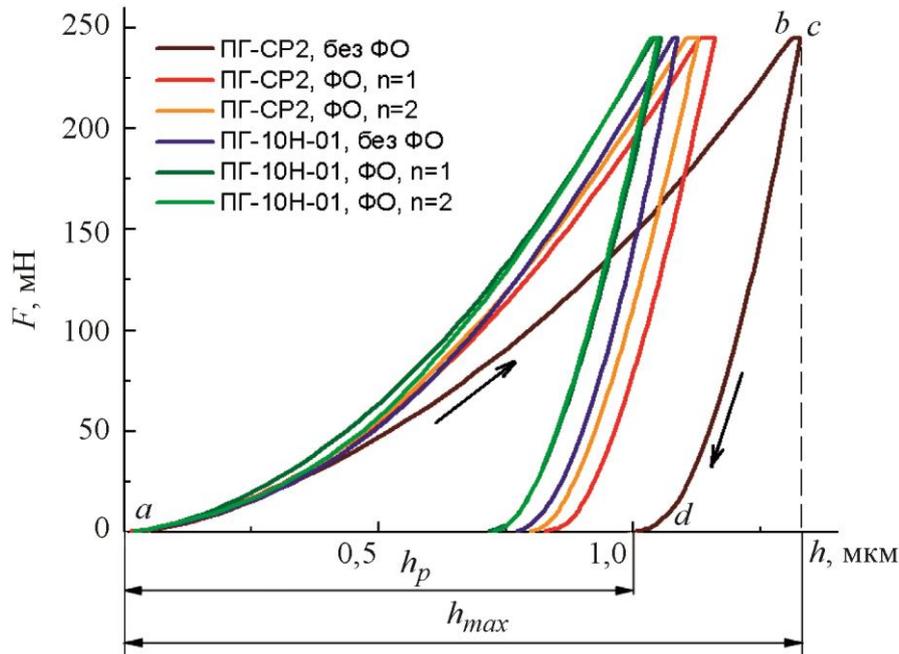
Фрикционную обработку проводили путем возвратно-поступательного движения полусферического индентора по поверхности покрытия в воздушной среде. Материал индентора – мелкодисперсный кубический нитрид бора DBN; нагрузка на индентор при обработке покрытия ПГ-CP2 – 150 Н; при обработке покрытия ПГ-10Н-01 – 500 Н; скорость движения индентора – 0,013 м/с; длина хода – 16 мм; смещение индентора – 0,1 мм на двойной ход. При фрикционной обработке варьировалась кратность воздействия на поверхность индентором n : 1, 2.

Инструментальное микроиндентирование проводили с использованием измерительной системы Fischerscope HM2000 XYm, оснащенной индентором Виккерса и программным обеспечением WIN-HCU. В процессе микроиндентирования осуществлялась запись диаграмм нагружения и разгрузки индентора. Максимальная нагрузка на индентор при индентировании составила 0,245 Н. Время нагружения/разгрузки – 20 с. Время выдержки при максимальной нагрузке – 5 с. Расчет микромеханических параметров осуществлялся согласно стандарту ISO 14577 [15].

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рисунке представлены медианные диаграммы нагружения и разгрузки индентора Виккерса при инструментальном микроиндентировании покрытий ПГ-CP2 и ПГ-10Н-01 в исходном полированном состоянии, а также после фрикционной обработки индентором из DBN при нагрузках 150 и 500 Н для покрытий ПГ-CP2 и ПГ-10Н-01 соответственно, и кратности воздействия на поверхность индентором $n = 1$ и $n = 2$. Отметим, что фрикционная обработка каждого покрытия по исследованным технологическим режимам оказывает влияние на тип и положение линий, смещая их в сторону более низких значений перемещения индентора h во время индентирования по сравнению с показателем h для поверхностей в исходном состоянии. При этом покрытие ПГ-CP2, содержащее в своем составе меньше легирующих элементов (углерода, хрома, бора), во всех состояниях характеризуется большими

значениями перемещения индентора h во время индентирования по сравнению с показателем h для более легированного покрытия ПГ-10Н-01.



Экспериментальные кривые «нагрузка F – перемещение индентора h » при микроиндентировании покрытий ПГ-CP2 и ПГ-10Н-01 в исходном состоянии, а также после фрикционной обработки (ФО) при различном количестве сканирований поверхности индентором (n)

Таблица 1

Результаты микроиндентирования образцов с покрытиями ПГ-CP2 и ПГ-10Н-01 в исходном состоянии и после фрикционной обработки (ФО) при различном количестве сканирований поверхности индентором (n)

Покрытие	Состояние	h_{max} , мкм	h_p , мкм	HM , ГПа	H_{IT} , ГПа	E^* , ГПа	$W_e, 10^{-3}$ мкДж	$W_t, 10^{-3}$ мкДж
ПГ-CP2	Исходное	1,42 $\pm 0,04$	1,09 $\pm 0,05$	4,73 $\pm 0,26$	6,2 $\pm 0,4$	212 ± 8	27,1 $\pm 0,8$	118,9 $\pm 5,3$
	ФО, $n = 1$	1,24 $\pm 0,02$	0,89 $\pm 0,02$	6,33 $\pm 0,16$	8,8 $\pm 0,3$	217 ± 4	30,8 $\pm 0,4$	100,6 $\pm 1,8$
	ФО, $n = 2$	1,21 $\pm 0,01$	0,87 $\pm 0,01$	6,64 $\pm 0,12$	9,4 $\pm 0,2$	220 ± 2	31,3 $\pm 0,2$	97,1 $\pm 1,3$
ПГ-10Н-01	Исходное	1,17 $\pm 0,03$	0,83 $\pm 0,04$	7,0 $\pm 0,3$	10,0 $\pm 0,6$	240 ± 11	30,4 $\pm 0,9$	94,9 $\pm 4,0$
	ФО, $n = 1$	1,13 $\pm 0,03$	0,79 $\pm 0,03$	7,4 $\pm 0,4$	10,8 $\pm 0,6$	245 ± 10	30,9 $\pm 0,5$	91,1 $\pm 2,5$
	ФО, $n = 2$	1,13 $\pm 0,02$	0,80 $\pm 0,02$	7,4 $\pm 0,2$	10,9 $\pm 0,4$	241 ± 8	31,4 $\pm 0,8$	92,1 $\pm 2,3$

Используя кривые нагружения ($a \rightarrow b$) и разгружения ($c \rightarrow d$), (изображенные на рисунке) по методу Оливера и Фарра [16] определяли характеристики, отражающие особенности ме-

ханического поведения рассматриваемых покрытий при упругопластическом деформировании (табл. 1).

Данные табл. 1 свидетельствуют, что фрикционная обработка поверхности покрытия ПГ-СР2 ощутимо снижает значения максимальной h_{max} (до 1,21–1,24 мкм) и остаточной h_p (до 0,87–0,89 мкм) глубин вдавливания индентора по сравнению со значениями для поверхности в исходном состоянии ($h_{max} = 1,42$ мкм и $h_p = 1,09$ мкм), что приводит к значительному повышению после фрикционной обработки значений твердости по шкале Мартенса HM , учитывающей как пластическую, так и упругую деформацию (от 4,73 ГПа до 6,33–6,64 ГПа), а также значений твердости индентирования при максимальной нагрузке H_{IT} (от 6,2 ГПа до 8,8–9,4 ГПа). Повышение H_{IT} означает увеличение сопротивления постоянной деформации [15].

Фрикционная обработка поверхности покрытия ПГ-10Н-01 также приводит к снижению значений h_{max} и h_p (от 1,17 мкм до 1,13 мкм и от 0,83 до 0,79–0,80 мкм соответственно) и повышению значений HM и H_{IT} (от 7,0 до 7,4 ГПа и от 10,0 до 10,8–10,9 ГПа соответственно), однако эти изменения относительно исходного полированного состояния менее существенны, чем для покрытия ПГ-СР2. Модуль упругости при индентировании E^* обоих покрытий после фрикционной обработки с различным количеством сканирований поверхности индентором меняется незначительно (табл. 1).

Важно также отметить, что повышение кратности воздействия индентором (от 1 до 2) на поверхность более легированного и твердого покрытия ПГ-10Н-01 не приводит к существенным изменениям значений твердости, в то время как второе воздействие индентора при фрикционной обработке на поверхность менее твердого и более пластичного покрытия ПГ-СР2 способствует дополнительному росту твердости (по сравнению с однократным воздействием индентором). Это свидетельствует о меньшей способности твердого покрытия ПГ-10Н-01 к деформационному упрочнению в результате проведения фрикционной обработки.

Из данных табл. 1 следует также, что значения общей механической работы вдавливания W_t , состоящей из работы пластической деформации и работы упругого восстановления, снижаются после фрикционной обработки, свидетельствуя о том, что поверхность покрытий после обработки меньше деформируется под индентором и, соответственно, меньшая работа затрачивается на такое деформирование. Работа упругой деформации при индентировании W_e , освобождаемая при снятии приложенной нагрузки, увеличивается при реализации фрикционной обработки. Эти показатели также более существенно изменяются для покрытий ПГ-СР2, особенно при реализации двукратного сканирования его поверхности индентором.

Таблица 2

Пластическая составляющая работы $(1-(W_e/W_t)) \cdot 100$, упругое восстановление R , отношения H_{IT}/E^* и H_{IT}^3/E^{*2} , рассчитанные по результатам микроиндентирования образцов с покрытиями ПГ-СР2 и ПГ-10Н-01 в исходном состоянии и после фрикционной обработки (ФО) при различном количестве сканирований поверхности индентором (n)

Покрытие	Состояние	$(1-(W_e/W_t)) \cdot 100, \%$	$R, \%$	$H_{IT}/E^*, 10^{-3}$	$H_{IT}^3/E^{*2}, 10^{-3}, \text{ ГПа}$
ПГ-СР2	Исходное	77,2	23,0	29,1	5,2
	ФО, $n = 1$	69,4	27,7	40,6	14,6
	ФО, $n = 2$	67,8	27,5	42,6	17,0
ПГ-10Н-01	Исходное	68,8	28,6	41,6	17,3
	ФО, $n = 1$	66,2	30,3	44,1	21,0
	ФО, $n = 2$	67,3	29,7	45,0	22,0

Значения работ W_f и W_e были использованы при расчете пластической составляющей работы, совершенной при индентировании поверхности покрытий: $(1 - (W_e/W_f)) \cdot 100$ (табл. 2). Наибольшей пластической составляющей работы при индентировании (77,2 %) обладает покрытие ПГ-СР2 в исходном состоянии. Фрикционная обработка покрытия ПГ-СР2 приводит к значительному снижению значений указанного показателя (до 67,8 % при $n = 2$), приближаясь к значениям для покрытия ПГ-10Н-01 (68,8 % в исходном состоянии и 66,2–67,3 % после фрикционной обработки).

В табл. 2 представлен также ряд других определенных по данным микроиндентирования расчетных параметров для двух исследованных покрытий в зависимости от их состояния. Эти параметры используются для оценки сопротивления поверхности материалов упругопластическому деформированию при механическом контактном нагружении [17–21]. Из приведенных данных следует, что поверхности в исходном состоянии обладают минимальными значениями упругого восстановления $R = ((h_{max} - h_p)/h_{max}) \cdot 100$, отношений H_{IT}/E^* и H_{IT}^3/E^{*2} по сравнению с фрикционно обработанными поверхностями соответствующих покрытий, при этом нельзя однозначно оценить влияние кратности фрикционного воздействия на указанные параметры.

4. Заключение

По данным инструментального микроиндентирования, фрикционная обработка поверхности покрытий ПГ-СР2 и ПГ-10Н-01 по сравнению с исходным полированным состоянием привела к росту прочностных характеристик поверхностного слоя покрытия, а также параметров, свидетельствующих о сопротивлении поверхности материала упругопластическому деформированию, при этом для более мягкого и пластичного покрытия ПГ-СР2 изменение значений параметров, определенных в результате микроиндентирования, более существенно, чем для покрытия ПГ-10Н-01.

Повышение кратности воздействия на поверхность индентором от 1 до 2 для более легированного и твердого покрытия ПГ-10Н-01 не приводит к существенным изменениям значений твердости, в то время как второе воздействие индентора при фрикционной обработке поверхности покрытия ПГ-СР2 способствует дополнительному росту твердости. Это свидетельствует о возможности проведения фрикционной обработки покрытия ПГ-10Н-01 при однократном сканировании поверхности индентором, что снизит операционное время для получения в результате фрикционной обработки упрочненной поверхности, и о возможном дополнительном упрочнении поверхности покрытия ПГ-СР2 путем повышения воздействия индентором при проведении фрикционной обработки.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и ИФМ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020190116-6. Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Литература

1. Comparison of Ni-Based Self-Fluxing Remelted Coatings for Wear and Corrosion Applications / N. Kazamer, R. Muntean, P. C. Vălean, D. T. Pascal, G. Mărginean, V.-A. Șerban // Materials. – 2021. – Vol. 14, No. 12. – 3293. – DOI: 10.3390/ma14123293.
2. Study of KCl-induced hot corrosion behavior of high velocity oxy-fuel sprayed NiCrAlY and NiCrBSi-coatings deposited on 12CrMoV boiler steel at 700 °C / X. Liu, K. Hu, S. Zhang, T. Xu, L. Chen, E. Byon, D. Liu // Corrosion Science. – 2022. – Vol. 203. – 110351. – DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110351.

3. Kalyankar V. D., Wanare S. P. Comparative Investigations on Microstructure and Slurry Abrasive Wear Resistance of NiCrBSi and NiCrBSi-WC Composite Hardfacings Deposited on 304 Stainless Steel // *Tribology in Industry*. – 2022. – Vol. 22, No. 2. – P. 199–211. – DOI: 10.24874/ti.1075.03.21.05.
4. Soboleva N. N., Makarov A. V. Effect of Conditions of High-Temperature Treatment on the Structure and Tribological Properties of Nickel-Based Laser-Clad Coating // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2021. – Vol. 62. – P. 682–691. – DOI: 10.3103/S1067821221060183.
5. Li W., Li J., Xu Y. Optimization of Corrosion Wear Resistance of the NiCrBSi Laser-Clad Coatings Fabricated on Ti6Al4V // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11, No. 8. – P. 960. – DOI: 10.3390/coatings11080960.
6. Microstructure and wear behaviors of WC-Ni coatings fabricated by laser cladding under high frequency micro-vibration / C. Li, Q. Zhang, F. Wang, P. Deng, Q. Lu, Y. Zhang, S. Li, P. Ma, W. Li, Y. Wang // *Applied Surface Science*. – 2019. – Vol. 485. – P. 513–519. – DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.04.245.
7. Laser cladding of Stellite 6 on stainless steel to enhance solid particle erosion and cavitation resistance / R. Singh, D. Kumar, S. K. Mishra, S. K. Tiwari // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 351. – P. 87–97. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.04.008.
8. Effect of Grinding Environments on Magnetic Response of AISI D2 Tool Steel / A. Chaudhari, A. S. Awale, M. Z. K. Yusufzai, M. Vashista // *Russian Journal of Non-destructive Testing*. – 2021. – Vol. 57, No. 3. – P. 212–221. – DOI: 10.1134/S1061830921030062.
9. Повышение микромеханических свойств и износостойкости хромоникелевого лазерного покрытия финишной фрикционной обработкой / А. В. Макаров, Н. Н. Соболева, Р. А. Саврай, И. Ю. Малыгина // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. – 2015. – № 4. – С. 60–67. – DOI: 10.18323/2073-5073-2015-4-60-67.
10. Wear resistance of a laser-clad NiCrBSi-coating hardened by frictional finishing / N. N. Soboleva, A. V. Makarov, I. Y. Malygina, R. A. Savrai // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 1785. – P. 030028. – DOI: 10.1063/1.4967049.
11. Makarov A. V., Soboleva N. N., Malygina I. Y. Thermal stability of a laser-clad NiCrBSi-coating hardened by frictional finishing // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1915. – P. 030012. – DOI: 10.1063/1.5017332.
12. Способ получения упрочненного никельхромборкремниевого покрытия на металлических деталях : пат. 2709550 Рос. Федерация / Соболева Н. Н., Макаров А. В., Малыгина И. Ю. – Оpubл. в БИМП, 2019, Бюл № 35.
13. A study on microstructure and flame erosion mechanism of a graded Ni–Cr–B–Si coating prepared by laser cladding / H.-F. Xuan, Q.-Y. Wang, S.-L. Bai, Z.-D. Liu, H.-G. Sun, P.-C. Yan // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 244. – P. 203–209. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.02.021.
14. Estimating the effect of fillers on the mechanical properties of epoxy glue coatings by microindentation / S. V. Smirnov, I. A. Veretennikova, E. O. Smirnova, A. V. Pestov // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2017. – №. 6. – P. 103–111. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.6.103-111. URL: http://dream-journal.org/DREAM_Issue_6_2017_Smirnov_S.V._et_al._103_111.pdf
15. ISO 14577–1:2002. Metallic materials Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. – Test method: part 1. – 2002.
16. Oliver W. C., Pharr J. M. Improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // *Journal of Materials Research*. – 1992. – Vol. 7, iss. 6. – P. 1564–1583.
17. 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. – P. 201–208. – DOI: 10.1016/0257-8972(93)90226-E.

18. Cheng Y. T., Cheng C. M. Relationships between hardness, elastic modulus and the work of indentation // *Applied Physics Letters*. – 1998. – Vol. 73, No. 5. – P. 614–618. – DOI: 10.1063/1.121873.
19. Износостойкость и механические свойства сплавов медицинского назначения / М. И. Петржик, М. Р. Филонов, К. А. Печеркин, Е. А. Левашов, В. Н. Олесова, А. И. Поздеев // *Известия ВУЗов. Цветная металлургия*. – 2005. – № 6. – С. 62–69.
20. 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. – P. 966–974. – DOI: 10.1134/S1063774507060065.
21. 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., No 5. – С. 7–18. – DOI: 10.15407/scin6.05.07.