

УДК 621.81

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-1-36-43

## Исследование структуры, кристаллографической текстуры, микро топографии поверхности функциональных покрытий, нанесенных гибким инструментом, и некоторые области их применения

### Часть 2. Исследование влияния функциональных покрытий, нанесенных гибким инструментом, на некоторые свойства материалов и области их применения

© 2018 г. И.В. Белевская, Л.С. Белевский, Е.В. Губарев, Ю.Ю. Ефимова

Магнитогорский государственный технический университет (МГТУ) им. Г.И. Носова

Статья поступила в редакцию 16.08.16 г., доработана 10.03.17 г., подписана в печать 14.03.17 г.

Для наноструктурирования поверхности использован один из простых методов модифицирования поверхности с одно-временным нанесением покрытий – фрикционное плакирование (ФП). При ФП интенсивная пластическая деформация осуществляется вращающейся проволочной щеткой (ВПЩ), ворсинки которой оказывают на обрабатываемую поверхность ударно-фрикционное воздействие и одновременно наносят покрытие. Проведено исследование износостойкости стальных образцов (диаметром 45 мм, шириной 10 мм) из стали марки 45, подвергнутых нормализации. Медьсодержащие покрытия наносили на круглошлифовальном станке. Испытания образцов, обработанных по различным режимам, проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме «диск по диску». Установлено, что образцы с медным (М1) и латунным (Л63) покрытиями имели, в зависимости от режима обработки, износостойкость выше эталонных в 2–10 раз. Наибольшую износостойкость показали образцы с латунным покрытием толщиной 10–15 мкм, нанесенным за 6 проходов с натягом (подача ВПЩ на обрабатываемое изделие) 2 мм при скорости скольжения 25 м/с. Для изучения влияния режимов процесса ФП на усталостную прочность проведены испытания гладких образцов (4 серии – 60 шт.) из стали марки 20ХН в соответствии с ГОСТ 25502-82 «Методы испытаний на усталость». Анализ результатов показал, что наиболее эффективным является поверхностное пластическое деформирование с нанесением латунного покрытия. Коэффициент повышения предела выносливости составлял  $K_v = 1,41$ . Выявлено, что получение покрытий методом ФП не влияет на механические свойства стали ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta_{10}$ ). Нанесение медного покрытия на штоки и плунжеры гидравлики позволило увеличить срок их службы в 1,4–3,0 раза, на зубья колес волновых передач торцевого исполнения – в 6 раз.

**Ключевые слова:** фрикционное плакирование, гибкий инструмент, покрытие, износостойкость, механические свойства, предел усталости, лазер.

**Белевская И.В.** – магистрант кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования МГТУ им. Г.И. Носова (455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38). E-mail: belirena@yandex.ru.

**Белевский Л.С.** – докт. техн. наук, профессор этой кафедры. E-mail: l.belevskiy@mail.ru.

**Губарев Е.В.** – ассистент кафедры физики МГТУ им. Г.И. Носова. E-mail: john\_g@mail.ru.

**Ефимова Ю.Ю.** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов МГТУ им. Г.И. Носова. E-mail: jefimova78@mail.ru.

**Для цитирования:** Белевская И.В., Белевский Л.С., Губарев Е.В., Ефимова Ю.Ю. Исследование структуры, кристаллографической текстуры, микро топографии поверхности функциональных покрытий, нанесенных гибким инструментом, и некоторые области их применения. Часть 2. Исследование влияния функциональных покрытий, нанесенных гибким инструментом, на некоторые свойства материалов и области их применения // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2018. No. 1. С. 36–43. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-1-36-43.

*Belevskaya I.V., Belevskii L.S., Gubarev E.V., Efimova Yu.Yu.*

**Investigation of surface structure, crystallographic texture, microtopography of functional coatings deposited using flexible tool and some applications. Part 2. Investigation of the effect of functional coatings applied using flexible tool on some properties of materials and applications**

Friction cladding as one of the simplest methods of surface modification with simultaneous coating application was used for surface nanostructuring. Intensive plastic deformation using a rotating wire brush (RWB) was performed during friction cladding. Brush fibers had an impulse-friction effect on the work surface with simultaneous coating application. Normalized steel samples

(diameter 45 mm, width 10 mm) made of Grade 45 steel were tested for wear resistance. A copper-containing coating was applied at a circular grinder. Samples treated by various operating modes were tested at the SMC-2 friction machine using a disk-to-disk friction drive scheme. The tests showed that samples with a copper coating (C1) and a brass coating (B63) feature 2–10 times higher wear resistance in comparison than reference ones depending on the treatment mode. Samples with a brass coating (coating thickness 10–15  $\mu\text{m}$ ) applied in 6 passes with 2 mm interference (RWB feed on the work piece) at a sliding speed of 25 m/s demonstrated the highest strength. Smooth specimens (four series, a total of 60 pieces) made of 20CN steel were tested according to GOST 25502-82 «Fatigue Test Methods» to study the effect of friction cladding modes on endurance. Test results showed that the most effective way is surface plastic deformation with brass coating application. The endurance limit increase factor was  $K_0 = 1,41$ . It was found that steel mechanical properties ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta_{10}$ ) are not affected by coating application using friction cladding. Copper coating applied on coupling rods and plungers in hydraulic systems ensured 1,4–3,0 times longer service life, and up to 6 times longer life when applied on wave gear teeth in edge version.

**Keywords:** friction cladding, flexible tool, coating, wear resistance, mechanical properties, fatigue strength, laser.

**Belevskaya I.V.** – postgraduate student of the Department «Design and exploitation of metallurgical of machinery and equipment» of the Magnitogorsk State Technical University (MSTU) n.a. G.I. Nosov (455000, Russia, Magnitogorsk, Lenina av., 38). E-mail: belirena@yandex.ru.

**Belevskii L.S.** – Dr. Sci. (Tech.), professor of the Department «Design and exploitation of metallurgical of machinery and equipment» of MSTU. E-mail: l.belevskiy@mail.ru.

**Gubarev E.V.** – assistant of the Department of physics of MSTU. E-mail: john\_g@mail.ru.

**Efimova Yu.Yu.** – Cand. Sci. (Tech.), associate prof. of the Department «Material processing technologies» of MSTU. E-mail: jefimova78@mail.ru.

**Citation:** *Belevskaya I.V., Belevskii L.S., Gubarev E.V., Efimova Yu.Yu.* Issledovanie struktury, kristallograficheskoi tekstury, mikrotopografii poverkhnosti funktsional'nykh pokrytii, nanesennykh gibkim instrumentom, i nekotorye oblasti ikh primeneniya. Chast' 2. Issledovanie vliyaniya funktsional'nykh pokrytii, nanesennykh gibkim instrumentom, na nekotorye svoystva materialov i oblasti ikh primeneniya. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya.* 2018. No. 1. P. 36–43. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-1-36-43.

## Введение

Для наноструктурирования поверхности изделий могут быть использованы различные методы интенсивной пластической деформации (ИПД) [1–6], в том числе и фрикционные [7–16]. Одним из простых и перспективных методов модифицирования поверхности с одновременным нанесением покрытий является фрикционное плакирование (ФП), при котором ИПД осуществляется вращающейся проволочной щеткой (ВПЩ). Ее ворсинки оказывают на обрабатываемую поверхность ударно-фрикционное воздействие и одновременно наносят покрытие [17]. Фрикционное плакирование гибким инструментом позволяет упрочнять поверхность и получать антифрикционные, антикоррозионные, жаростойкие и другие виды покрытий [18–20]. В работе [21] изложены результаты разработки композиционного материала на основе спеченного порошка алюминия с добавками наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Методом ФП можно наносить покрытия из композиционных материалов с медной матрицей и упрочняющими частицами нанодiamondов [22]. В настоящей работе изучено влияние функциональных покрытий на некоторые свойства материалов и рассмотрены области их практического применения.

## Материалы, оборудование, методика

Для металлографических исследований использовали растровый электронный микроскоп (РЭМ) JSM-6490 LV (Jeol, Япония) во вторичных электронах.

Износостойкость цилиндрических образцов из стали марки 45 исследовали на машине трения СМЦ-2 (завод испытательных приборов, г. Иваново). Испытания на усталость образцов из стали марки 20ХН проводили на машине МУИ-6000 (завод «Импульс», г. Иваново) в соответствии с ГОСТ 25502-82 «Методы испытаний на усталость». Шероховатость измеряли и анализировали на образцах диаметром 10 мм по методике стандарта ISO 25178 на установке «Contour GT K1» (Bruker, Германия).

## Результаты и их обсуждение

**Антифрикционные медьсодержащие покрытия.** Проведено исследование износостойкости стальных нормализованных образцов с покрытиями. Была подготовлена партия образцов (диаметром 45 мм и шириной 10 мм) из стали марки 45, подвергнутых нормализации. Медьсодержащие покрытия наносили на круглошлифовальном стан-

ке. Для выявления влияния режима обработки на толщину покрытия и износостойкость образцов был спланирован эксперимент по симметричному некомпозиционному плану Бокса—Бенкина [13]. Образцы, обработанные по различным режимам (табл. 1), были испытаны на машине трения по схеме «диск по диску». В паре истирались образцы, обработанные по одному режиму.

Всего было испытано 39 серий образцов — в каждой серии по 4 пары образцов, обработанных по одному режиму. Образцы первой серии после шлифования обработке не подвергались. Они являлись эталонными, и их износостойкость принимали за базу для сравнения с ней износостойкости образцов с покрытиями. При испытании на износ следили за потерей массы образцов, взвешивая их через каждые 3000 оборотов нижнего образца на аналитических весах с точностью до  $10^{-4}$  г, измеряли также их диаметр, контролировали шероховатость поверхности и наличие покрытия. Испытания прекращали после того, как потеря массы верхним образцом достигала значения 1 г. Было установлено, что образцы с медным (М1) и латунным (Л63) покрытиями имели, в зависимости от режима обработки, износостойкость выше эталонных в 2—10 раз. Наибольшую износостойкость показали образцы с латунным покрытием толщиной 10—15 мкм, нанесенным за 6 проходов с натягом (подача ВПШ на обрабатываемое изделие) 2 мм, при скорости скольжения 25 м/с (рис. 1).

Исследована износостойкость стальных образцов из стали марки 45, подвергнутых объемной закалке (твердость поверхности 45—51 HRC). Закаленные образцы испытывали на машине трения по схеме «диск—колодка». Истирание образца о бронзовую колодку проводили со смазкой. Испытания прекращали после того, как потеря массы образца достигала 0,03 г. Установлено, что износостойкость образцов с медным и латунным по-

Таблица 1. Характеристика режимов ФП-обработки образцов

Режим обработки	Натяг, мм	Число проходов	Скорость скольжения, м/с
Без обработки (б/о)	—	—	—
I	1,5	4	25
II	2,0	6	25
III	1,5	3	25
IV	1,0	6	25

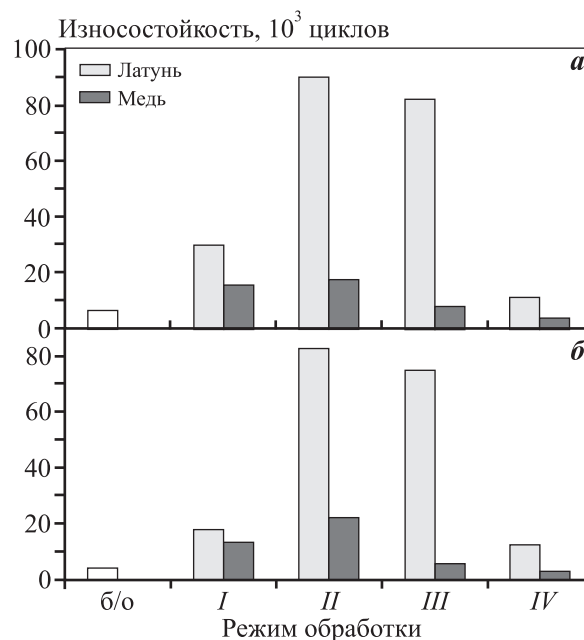


Рис. 1. Влияние режима ФП-обработки (см. табл. 1) на износостойкость образцов при усилии их прижатия 184 Н (а) и 327 Н (б)

крытиями в 2,0—2,1 раза выше, чем образцов без покрытия.

**Определение трибологических свойств антифрикционных покрытий на торцевой машине трения<sup>1</sup>.** Для определения зависимости коэффициента трения от вида покрытия и режима обработки была проведена серия испытаний с использованием торцевой машины трения, разработанной во ВНИИТрансмаш (г. Санкт-Петербург). Образцы 32×40×3 мм изготавливались из холоднокатаной стали 50. На них были нанесены покрытия из следующих материалов: медь, латунь Л68, бронза Бр.ОЦС5-5-5, олово, медь—свинец (30 %), латунь +  $\text{MoS}_2$ . Результаты испытаний показали, что при малых скоростях скольжения ( $V_{\text{ск}} = 4,2$  м/мин) на незакаленной подложке минимальный коэффициент трения ( $f_{\text{min}}$ ) обеспечивают латунные и медные покрытия. При  $V_{\text{ск}} = 84$  м/мин величину  $f_{\text{min}}$  давало медное покрытие. На закаленных образцах при  $V_{\text{ск}} = 84$  м/мин стабильные значения  $f_{\text{min}} = 0,045 \pm 0,05$  наблюдали у медного покрытия.

**Испытания образцов на усталость.** Для изучения влияния режимов процесса ФП на усталостную прочность проведены испытания гладких

<sup>1</sup> Работа выполнена при участии Д.Д. Борисова.

образцов из стали марки 20ХН. Было изготовлено 60 образцов (4 серии). Образцы первой серии после точения и шлифования обработке ВМЩ не подвергались. Рабочую часть образцов остальных серий (ширина рабочей поверхности — 15 мм) обработали ВМЩ с наружным диаметром 250 мм, диаметр проволоки ворса составлял 0,28–0,30, длина ворса — 40 мм, натяг — 1,5 мм, число проходов — 5. Образцы второй серии были обработаны ВМЩ без нанесения покрытия, на образцы третьей серии наносилось алюминиевое покрытие, у четвертой серии — латунное покрытие. Толщина покрытий составляла 7–10 мкм. Для оценки эффективности применения ФП использовали коэффициент повышения предела выносливости

$$K_v = \sigma_{-1p} / \sigma_{-1},$$

где  $\sigma_{-1p}$  — предел выносливости при ФП;  $\sigma_{-1}$  — предел выносливости образцов, не обработанных ВМЩ.

Анализ результатов показывает, что наиболее эффективным является поверхностное пластическое деформирование с нанесением латунного покрытия ( $K_v = 1,41$ ).

**Нанесение антифрикционных покрытий на детали машин для повышения износостойкости. Области применения обработки деталей методом ФП.** В качестве примера рассмотрим обработку группы деталей металлургического оборудования, контроль над эксплуатацией которого осуществлялся в течение двух лет.

*Штоки гидроцилиндров длиной 3190–5165 мм и диаметром 60–90 мм механизма перемещения стола наждачно-зачистных станков прокатного цеха.* Штоки изготавливаются из стали марки 45 с последующей закалкой токами высокой частоты до твердости 50–55 HRC. Шток работает в паре с бронзовыми втулками и резиновыми уплотнителями в режиме граничного трения в условиях сильной запыленности. Во время работы окалина вместе с абразивной пылью налипают на маслянистый шток, вызывая его интенсивный износ. Штоки не ремонтируются и после наступления предельно допустимого износа выбраковываются. Все штоки обрабатывали по одному режиму: натяг — 1,5 мм; скорость скольжения — 37,7 м/с; подача — 0,5 мм/об; число проходов — 3; диаметр ворса ВПЩ — 0,25–0,30 мм. Материал покрытия — медь М1. Испытания показали увеличение стойкости в 1,4–3,0 раза.

*Плунжеры механизма гидравлического уравновешивания рабочих валков клетей чистой и черновой группы стана 2500 горячей прокатки.* Плунжеры изготавливаются из стали марки 45 или 20ХГСНМ, термообработка — нормализация или закалка. Все обработанные плунжеры с нанесенным медным покрытием были установлены в подушки рабочих валков. Выявлено, что несмотря на истирание покрытия в процессе работы интенсивного износа плунжеров не наблюдается, на рабочей поверхности нет задиров, рисок, царапин. Результаты испытаний показали увеличение стойкости в 1,4–1,7 раза.

*Зубчатые венцы волновых передач и роторы электрических машин.* Покрытия наносили на зубчатые венцы цилиндрических колес и волновых передач электрических машин малой мощности (ЭМММ) на специально разработанной установке. Модуль зацепления составлял 0,15±0,5 мм, диаметры торцевых колес — 40±200 мм, диаметры цилиндрических колес — 25±100 мм, материал колес — сталь марок 14Х14Н2, Х16Н6, 20Х13. Условия эксплуатации: рабочие температуры — от –60 до +200 °С, механические воздействия — вибрационные нагрузки, диапазон частот — 1±2000 Гц, ускорение — 10 г, удары многократные — 40 г, удары одиночные — 150 г, линейное ускорение — 20 г, атмосферное давление — до 10<sup>-6</sup> мм рт. ст.

На рис. 2 показана микроструктура двух участков поверхности зуба цилиндрического колеса. Под медьсодержащим покрытием толщиной ~1 мкм наблюдается деформированный слой, в котором происходит фрагментация феррита на более мелкие зерна (см. рис. 2) и отмечается разрушение цементных пластин (рис. 2, б).

Зубья волновых передач торцевого исполнения изготавливаются трапециевидальной формы, поэтому в зацеплении имеет место трение скольжения, вызывающее сильный износ зубьев. При работе со смазкой (смазка 274) в условиях очень низких температур возможны отказы ЭМММ, что недопустимо по условиям эксплуатации изделия. Был необходим выбор материала покрытия зубьев колес, обеспечивающего работу без смазки или со смазкой, исключающей отказы в диапазоне рабочих температур. Было испытано 20 пар колес волновых передач торцевого исполнения на стендах ВНИИМЭМ (г. Санкт-Петербург). Срок службы колес без смазки (сталь по стали) при  $t = 93 \pm 110$  °С в коррозионной камере составил 15–30 ч. При медьсодержащем покрытии гибкого колеса

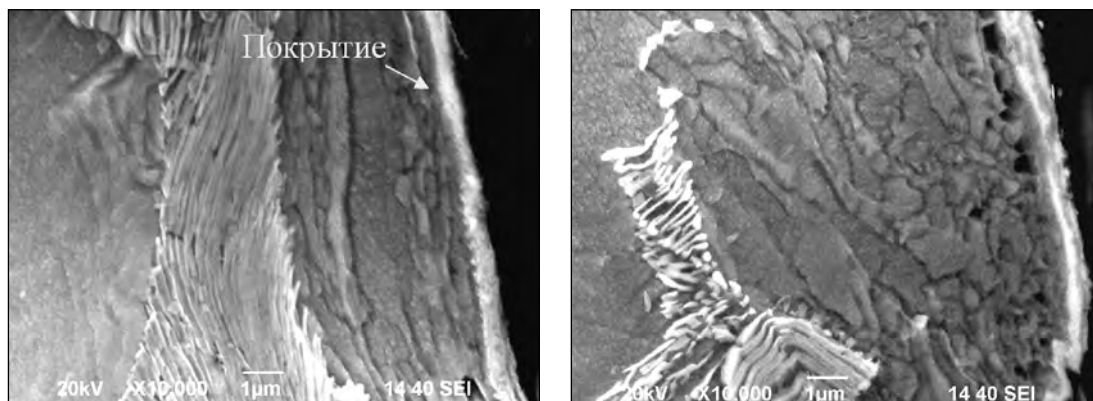


Рис. 2. Микроструктура поверхности зуба цилиндрического колеса с медьсодержащим покрытием

продолжительность работы в тех же условиях была 30 ч. Покрытие торцевого колеса сталью марки 20X13 увеличило этот показатель до 160 ч. На рис. 3 представлена микроструктура поверхности зуба торцевого колеса волновой передачи с покрытием из стали марки 20X13.

Микротвердость покрытия из стали марки 20X13 (толщина ~7 мкм) составляла ~9000 МПа, основы из стали марки 14X14Н2 — 3000 МПа. Наилучшие результаты получены при нанесении медьсодержащих покрытий на оба сопрягаемых колеса торцевой волновой зубчатой передачи — их срок службы увеличился до 200 ч.

Для защиты от коррозии роторов ЭМММ применяются лакокрасочные и гальванические никелевые покрытия толщиной 0,02 мм и более. Методом ФП возможно нанесение защитного металлического покрытия толщиной не более 0,007—0,01 мм, что позволит повысить энергетические показатели ЭМММ за счет уменьшения воздуш-

ного зазора между ротором и статором. Условия эксплуатации роторов ЭМММ — такие же, как и для волновых передач.

Нами была обработана партия роторов ЭМММ, которые в дальнейшем проходили испытания во ВНИИМЭМ. Были испытаны роторы с покрытиями толщиной от 5 до 10 мкм из алюминия, цинка, кадмия, а также ряда сплавов. Результаты показали, что при толщине покрытия 7—9 мкм можно подобрать его состав, отвечающий перечисленным выше требованиям.

**Нанесение покрытий на поверхность, обработанную лазером<sup>1</sup>.** На рис. 4 показан вид поверхности ролика из стали марки 20, предварительно обработанного лазером (нагрев на глубину 50 мкм с оплавлением), без покрытия (рис. 4, а) и слатунным покрытием (рис. 4, б, в). Более толстое покрытие (рис. 4, в) почти полностью заполняет впадины между выступами; кроме того, вследствие фрикционного действия ВПЩ сглаживаются их вершины.

В табл. 2 представлены характеристики поверхности образца до и после нанесения покрытия, а на рис. 5 приведена диаграмма соотношения значений параметров микротопографии.

Вследствие заполнения неровностей и пустот латунью поверхность образца становится более «гладкой» и менее «развитой», о чем свидетельствует уменьшение значений  $S_a$ ,  $V_{ve}$ ,  $S_{dq}$ ,  $S_{dr}$  и возрастание  $S_{sk}$ . Увеличение количества пиков подтверждается повышением параметра  $S_{ds}$  и одновременным снижением  $S_{al}$ .

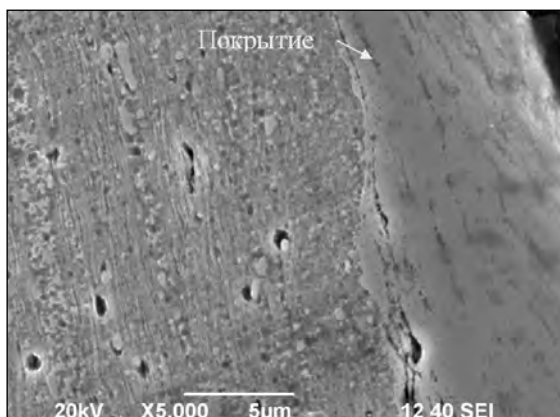


Рис. 3. Микроструктура поверхности зуба торцевого колеса волновой передачи с покрытием из стали марки 20X13

<sup>1</sup> Исследование проводилось в лаборатории Научно-исследовательского центра «Микротопография» МГТУ им. Г.И. Носова.

Таблица 2. Характеристики поверхности образца до и после нанесения латунного покрытия

Толщина покрытия, мкм	$S_a$ , мкм	$S_{ku}$	$S_{sk}$	$S_{dq}$ , град	$S_{dr}$ , %	$S_{ds}$ , мм <sup>-2</sup>	$S_{al}$ , мкм	$V_{vc}$ , мкм <sup>3</sup> /мкм <sup>2</sup>
Отсутствует	6,7	4,52	0,917	21,4	7,2	253	213	11,8
5–7	10,2	3,42	0,213	20,2	6,3	270	237	16,8
15–20	5,32	3,33	0,519	18,1	5,1	312	173	9,0

Примечание:  $S_a$  – среднее арифметическое отклонение выборки ординат поверхности;  $S_{ku}$  – коэффициент эксцесса выборки ординат поверхности;  $S_{sk}$  – коэффициент асимметрии выборки ординат поверхности;  $S_{dq}$  – параметр, отображающий средний угол наклона микрограней шероховатой поверхности;  $S_{dr}$  – показатель, характеризующий площадь шероховатой поверхности по отношению к площади гладкой номинальной поверхности;  $S_{ds}$  – количество выступов на единицу площади;  $S_{al}$  – автокорреляционная длина;  $V_{vc}$  – параметр, определяющий объем пустот шероховатого слоя.

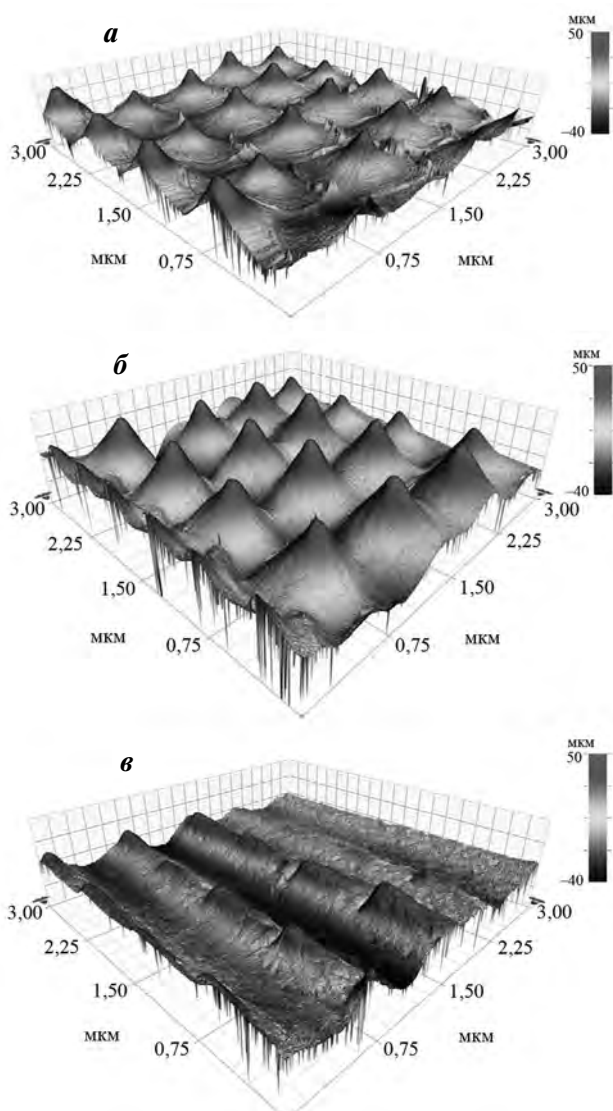


Рис. 4. Вид поверхности ролика из стали 20 после лазерной обработки

*a* – без покрытия

*б, в* – с последующим нанесением латунного покрытия  
Толщина покрытия: 5–7 мкм (*б*) и 20–25 мкм (*в*)

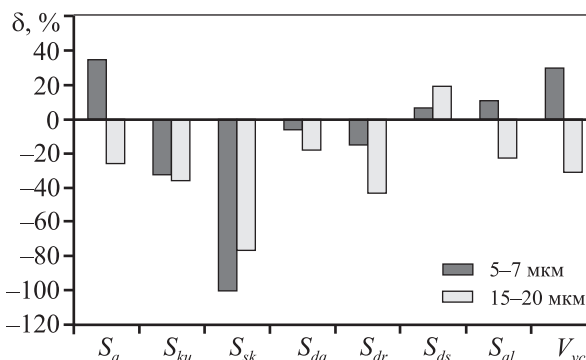


Рис. 5. Диаграмма процентного соотношения значений параметров микротопографии поверхности образца до и после нанесения покрытия различной толщины

С увеличением толщины покрытия следы лазерной обработки, представляющие собой отдельно стоящие вершины, объединяются в «хребты» и переходят из детерминированного профиля в периодический. Это видно по уменьшению коэффициента анизотропии текстуры поверхности  $S_{tr}$  ( $S_{tr} = 0,877$  – изотропная поверхность,  $S_{tr} = 0,072$  – анизотропная).

Нанесение антифрикционного покрытия может быть использовано для повышения износостойкости пар трения. Покрытия из алюминия или меди на обработанной лазером поверхности приводят к увеличению площади фактического контакта, его теплопроводности и несущей способности соединений с натягом.

## Заключение

Исследование стальных нормализованных образцов из стали марки 45 с покрытиями показало, что наибольшую износостойкость имеют образ-

цы с латунным покрытием толщиной 10–15 мкм, которая в 10 раз превышает износостойкость необработанных образцов. У стальных закаленных образцов с медным и латунным покрытиями износостойкость оказалась в 2,0–2,1 раза выше, чем у образцов без покрытия.

Установлено, что обработка поверхности ВПШ (нанесение покрытий методом ФП) не влияет на механические свойства стали ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta_{10}$ ).

Промышленные испытания деталей металлургического оборудования (штоки и плунжеры гидроцилиндров) с медным покрытием показали, что их износостойкость в 1,4–3,0 раза выше, чем в отсутствие покрытия.

Нанесение медьсодержащего покрытия на зубья волновых передач повысило срок их службы в 6 раз.

Покрытия из алюминия или меди обработанной лазером поверхности могут применяться для увеличения площади фактического контакта, его теплопроводности и несущей способности соединений с натягом.

*Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием высшего образовательного учреждения (договоры № 02.G25.31.0178 от 01.12.2015 г.; № МК204895 от 27.07.2015 г.).*

## Литература

1. *Валиев Р.З., Александров И.В.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000.
2. *Ivanisenko Yu., Winderlich R.K., Valiev R.Z., Fecht H.-J.* Annealing behaviour of nanostructured carbon steel produced by severe plastic deformation // *Scr. Mater.* 2003. Vol. 49. P. 947–952.
3. *Zhou L., Liu G., Han Z., Lu K.* Grain size effect on wear resistance of a nanostructured AISI52100 steel // *Scr. Mater.* 2008. Vol. 58. P. 445–448.
4. *Столяров В.В.* Объемное и поверхностное наноструктурирование титановых сплавов // *Физ.-хим. аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов.* 2014. No. 6. С. 379–389.
5. *Birringier R., Gleiter H.* Nanocrystalline materials // *Encyclopedia of materials science and engineering* / Ed. R.W. Cahn. Oxford: Pergamon Press, 1998. Vol. 1 (Suppl.). P. 339–349.
6. *Baranov Yu.V.* Influence of surface layer conditions on metals plasticity and strength // *Dependability and quality management: Proc. of 10th Intern. conf. ICDQM-2007 (Belgrade, Serbia, 13–14 June 2007).* 2007. P. 55–59.
7. *Макаров А.В., Поздеева Н.А., Малыгина И.Ю.* Повышение микротвердости и теплостойкости низкоуглеродистых сплавов железа при наноструктурировании поверхности фрикционной обработкой // *Деформация и разрушение материалов.* 2010. No. 5. С. 32–35.
8. *Makarov A.V., Savrai R.A., Gorkunov E.S., Yurovskikh A.S., Malygina I.Yu., Davydova N.A.* Structure, mechanical characteristics, and deformation and fractures of quenched structural steel under static and cyclic loading after combined strain-heat nanostructuring treatment // *Phys. Mesomech.* 2015. Vol. 18. No. 1. P. 43–57.
9. *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 // *Phys. Mesomech.* 2014. Vol. 17. No. 4. P. 250–264.
10. *Makarov A.V., Pozdeeva N.A., Savrai R.A., Yurovskikh A.S., Malygina I.Yu.* Improvement of wear resistance of hardened structural steel by nanostructuring frictional treatment // *J. Frict. Wear.* 2012. Vol. 33. No. 6. P. 433–442.
11. *Makarov A.V., Savrai R.A., Pozdejeva N.A., Smirnov S.V., Vichuzhanin D.I., Malygina I., Korshunov L.G.* 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 // *Surf. Coat. Technol.* 2010. Vol. 205. No. 3. P. 841–852.
12. *Wang Z.B., Tao N.R., Li S., Wang W., Liu G., Lu J., Lu K.* Effect of surface nanocrystallization on friction and wear properties in low carbon steel // *Mater. Sci. Eng. A.* 2003. Vol. 352. No. 1–2. P. 144–149.
13. *Lu K., Lu J.* Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment // *Mater. Sci. Eng. A.* 2004. Vol. 375–377. P. 38–45.
14. *Ba D.M., Ma S.N., Meng F.J., Li C.Q.* Friction and wear behaviors of nanocrystalline surface layer of chrome-silicon alloy steel // *Surf. Coat. Technol.* 2007. Vol. 202. P. 254–260.
15. *Xu Y.H., Peng J.H., Fang L.* Nano-crystallization of steel wire and its wear behavior // *Mater. Sci. Eng. A.* 2008. Vol. 483–484. P. 688–691.
16. *Golubchik E., Polyakova M., Gulin A.* Adaptive approach to quality management in combined methods of material processing // *Appl. Mech. Mater.* 2014. Vol. 656. P. 497–506.
17. *Белевский Л.С., Белевская И.В., Ефимова Ю.Ю.* Фрикционная наноструктурирующая обработка металлических поверхностей и нанесение функциональных покрытий гибким инструментом // *Порошк. металлургия и функц. покрытия.* 2014. No. 1. С. 70–76.
18. *Белевский Л.С.* Повышение надежности машин и материалов нанесением покрытий механическим способом // *Машиноведение.* 1989. No. 3. С. 39–41.
19. *Белевский Л.С., Анцупов В.П., Досманов В.А.* Повышение износостойкости нанесением медьсодержащих покрытий проволочными щетками // *Трение и износ.* 1989. Т. 10. No. 1. С. 119–123.
20. *Анцупов В.П., Белевский Л.С., Досманов В.А.* Уменьшение изнашиваемости закаленных деталей метал-

лизацией поверхности проволочными щетками // Трение и износ. 1991. Т. 12. No. 2. С. 365—368.

21. Костиков В.И., Агуреев Л.Е., Еремеева Ж.В. Разработка упрочненных наночастицами алюмокомпозитов для ракетно-космической техники // Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2014. No. 1. С. 35—38.
22. Popov V.A., Zaitsev V.A., Belevskiy L.S., Tulupov S.A., Matveyev D.V., Khodos I.I., Kovalchuk M.N. Investigations into the structure of nanocomposite materials and coatings on their basis applied by friction cladding // Inorg. Mater. Appl. Res. 2011. Vol. 2. No. 1. P. 57—64.
11. Makarov A.V., Savrai R.A., Pozdejeva N.A., Smirnov S.V., Vichuzhanin D.I., Malygina I., Korshunov L.G. 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. *Surf. Coat. Technol.* 2010. Vol. 205. No. 3. P. 841—852.
12. Wang Z.B., Tao N.R., Li S., Wang W., Liu G., Lu J., Lu K. Effect of surface nanocrystallization on friction and wear properties in low carbon steel. *Mater. Sci. Eng. A.* 2003. Vol. 352. No. 1—2. P. 144—149.
13. Lu K., Lu J. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment. *Mater. Sci. Eng. A.* 2004. Vol. 375—377. P. 38—45.
14. Ba D.M., Ma S.N., Meng F.J., Li C.Q. Friction and wear behaviors of nanocrystalline surface layer of chrome-silicon alloy steel. *Surf. Coat. Technol.* 2007. Vol. 202. P. 254—260.
15. Xu Y.H., Peng J.H., Fang L. Nano-crystallization of steel wire and its wear behavior. *Mater. Sci. Eng. A.* 2008. Vol. 483—484. P. 688—691.
16. Golubchik E., Polyakova M., Gulin A. Adaptive approach to quality management in combined methods of material processing. *Appl. Mech. Mater.* 2014. Vol. 656. P. 497—506.
17. Belevskii L.S., Belevskaya I.V., Efimova Yu.Yu. Friksionnaya nanostrukturiruyushchaya obrabotka metallicheskikh poverkhnostei i nanesenie funktsional'nykh pokrytii gibkim instrumentom [Friction nanostructuring treatment of metallik surfaces and deposition of functional coatings using a flexible tool]. *Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya.* 2014. No. 1. P. 70—76.
18. Belevskii L.S. Povyshenie nadezhnosti mashin i materialov naneseniem pokrytii mekhanicheskim sposobom [Increasing the reliability of the machines and materials by applying coatings mechanical method]. *Mashinovedenie.* 1989. No. 3. P. 39—41.
19. Belevskii L.S., Antsupov V.P., Dosmanov V.A. Povyshenie iznosostoikosti naneseniem med'soderzhashchikh pokrytii provolochnymi shchetkami [Increasing wear resistance by applying of copper-containing coatings by wire brushes]. *Trenie i iznos.* 1989. Vol. 10. No. 1. P. 119—123.
20. Antsupov V.P., Belevskii L.S., Dosmanov V.A. Umen'shenie iznashivaemosti zakalennykh detalei metallizatsiei poverkhnosti provolochnymi shchetkami [The reduction of wear of hardened parts by metallization of surface by wire brushes]. *Trenie i iznos.* 1991. Vol. 12. No. 2. P. 365—368.
21. Kostikov V.I., Agureev L.E., Eremeeva Zh.V. Razrabotka uprochnennykh nanochastitsami alyumokompozitov dlya raketno-kosmicheskoi tekhniki [Development of aluminium composites strengthened by nanoparticles for rocket and space technology]. *Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya.* 2014. No. 1. P. 35—38.
22. Popov V.A., Zaitsev V.A., Belevskiy L.S., Tulupov S.A., Matveyev D.V., Khodos I.I., Kovalchuk M.N. Investigations into the structure of nanocomposite materials and coatings on their basis applied by friction cladding. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2011. Vol. 2. No. 1. P. 57—64.

## References

1. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. Nanostrukturnye materialy, poluchennye intensivnoi plasticheskoi deformatsiei [Nanostructured materials obtained by severe plastic deformation.]. Moscow: Logos, 2000.
2. Ivanisenko Yu., Winderlich R.K., Valiev R.Z., Fecht H.-J. Annealing behaviour of nanostructured carbon steel produced by severe plastic deformation. *Scr. Mater.* 2003. Vol. 49. P. 947—952.
3. Zhou L., Liu G., Han Z., Lu K. Grain size effect on wear resistance of a nanostructured AISI52100 steel. *Scr. Mater.* 2008. Vol. 58. P. 445—448.
4. Stolyarov V.V. Ob"emnoe i poverkhnostnoe nanostrukturirovanie titanovykh splavov [Surface and surface nanostructuring of titanium alloys]. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov.* 2014. No. 6. P. 379—389.
5. Birringer R., Gleiter H. Nanocrystalline materials. In: *Encyclopedia of materials science and engineering.* Ed. R.W. Cahn. Oxford: Pergamon Press, 1998. Vol. 1 (Suppl.). P. 339—349.
6. Baranov Yu.V. Influence of surface layer conditions on metals plasticity and strength. In: *Dependability and quality management: Proc. of 10th Intern. conf. ICDQM-2007* (Belgrade, Serbia, 13—14 June 2007). 2007. P. 55—59.
7. Makarov A.V., Pozdeeva N.A., Malygina I.Yu. Povyshenie mikrotverdosti i teplostoikosti nizkouglerodistykh splavov zheleza pri nanostrukturirovanii poverkhnosti friksionnoi obrabotkoi [Increasing the micro-hardness and heat resistance of low carbon iron alloys when nanostructuring of surface by friction processing]. *Deformatsiya i razrushenie materialov.* 2010. No. 5. P. 32—35.
8. Makarov A.V., Savrai R.A., Gorkunov E.S., Yurovskikh A.S., Malygina I.Yu., Davydova N.A. Structure, mechanical characteristics, and deformation and fractures of quenched structural steel under static and cyclic loading after combined strain-heat nanostructuring treatment. *Phys. Mesomech.* 2015. Vol. 18. No. 1. P. 43—57.
9. 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. *Phys. Mesomech.* 2014. Vol. 17. No. 4. P. 250—264.
10. Makarov A.V., Pozdeeva N.A., Savrai R.A., Yurovskikh A.S., Malygina I.Yu. Improvement of wear resistance of hardened structural steel by nanostructuring frictional treatment. *J. Frict. Wear.* 2012. Vol. 33. No. 6. P. 433—442.