

УДК 621.81

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-62-70

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

Часть 1. Структура, кристаллографическая текстура и микротопография поверхности медных и латунных покрытий, нанесенных гибким инструментом на стальную основу

© 2017 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.

Рассмотрены наноструктурирующая обработка металлических поверхностей и нанесение функциональных покрытий гибким инструментом – вращающимися проволочными щетками (ВПЩ). Этот процесс, названный фрикционным плакированием, реализуется на токарных, шлифовальных и других металлорежущих станках с использованием простой оснастки или ручных углошлифовальных машин (УШМ). При металлографическом исследовании поверхностных слоев в качестве изучаемых образцов применялись пластины 3×20×100 мм из стали марки 08. Покрытия наносили на плоскошлифовальном станке, на котором размещались ВПЩ вместо абразивного круга и приспособление для подачи материала покрытия. Цилиндрические образцы (сталь марки 50) диаметром 20 мм обрабатывали на токарном станке, на суппорт которого устанавливалось приспособление с УШМ. Для металлографических исследований использовали оптические микроскопы и растровый электронный микроскоп РЭМ JSM-6490 LV. Электронно-микроскопические исследования проводили методом реплик на электронном микроскопе «Tesla BC-613». Рентгеноструктурный анализ выполняли с помощью дифрактометра «Дрон-3». Измерения и анализ шероховатости осуществляли по методике стандарта ГОСТ Р ИСО 25178 на установке «Contour GT K1» (Bruker). Проведено исследование структуры, текстуры и микротопографии поверхности медных и латунных покрытий, нанесенных гибким инструментом на стальную основу. Средняя толщина покрытий составляла 20–25 мкм, микротвердость медного покрытия – около 6800 МПа, латунного – 9000 МПа, размеры частиц – в пределах 0,3–0,6 мкм. Кристаллографическая текстура покрытий воспроизводит текстуру материала стальной основы. Изучение микротопографии поверхности образцов до и после нанесения покрытий показало, что латунное покрытие существенно сглаживает поверхность, но исходную микротопографию меняет незначительно. Микротопография медного покрытия существенно отличается от исходной.

Ключевые слова: фрикционное плакирование, гибкий инструмент, покрытие, поверхностное упрочнение, текстура, микротопография.

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, микротопографии поверхности функциональных покрытий, нанесенных гибким инструментом, и некоторые области их применения. Часть 1. Структура, кристаллографическая текстура и микротопография поверхности медных и латунных покрытий, нанесенных гибким инструментом на стальную основу // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2017. No. 4. С. 62–70. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-62-70.

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 1. Surface structure, crystallographic texture, microtopography of copper and brass coatings deposited on steel base using flexible tool

The paper focuses on metal surface nanostructuring and functional coating application using a flexible tool – rotating wire brushes (RWB). This process called friction cladding implemented on lathes, grinders and other machine tools using ordinary tooling or

manual angle grinders. Metallographic investigation of surface layers used 3×20×100 mm plates made of Steel 08 as study samples. Coatings were applied using the surface grinder where RWB was installed instead of an abrasive disk together with a coating material feeding device. Cylindrical samples (Steel 50) 20 mm in diameter were machined by angle grinders installed on the sliding carriage of the lathe. Optical microscopes and the JSM-6490 LV electron-scan microscope (ESM) were used for metallographic research. Electron microscopic studies were performed by replica technique using the Tesla BC-613 electron microscope. X-ray diffraction analysis was performed on the Dron-3 diffractometer. Measurements and surface roughness analysis were performed according to the GOST R ISO 25178 method on the Bruker Contour GT K1 unit. The surface structure, texture and microtopography of copper and brass coatings deposited using a flexible tool on a steel base were investigated. The average coating thickness was 20–25 μm, microhardness was about 6800 MPa for the copper coating and 9000 MPa for the brass coating with particle sizes ranging from 0,3 to 0,6 μm. The crystallographic texture of the coating reproduces the texture of the steel base material. Investigation of sample surface microtopography before and after coating showed that the brass coating substantially smooths out the surface, but the initial microtopography is changed insignificantly. Copper coating microtopography differs substantially from the initial one.

Keywords: friction cladding, flexible tool, coating, surface hardening, texture, microtopography.

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' 1. Struktura, kristallograficheskaya tekstura i mikrotopografiya poverkhnosti mednykh i latunnykh pokrytii, nanesennykh gibkim instrumentom na stal'nyu osnovu. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya.* 2017. No. 4. P. 62–70. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-62-70.

Введение

В настоящее время создавать крупногабаритные изделия из наноструктурных материалов не представляется возможным ввиду отсутствия технологии и из-за проблем, связанных со сварными соединениями. Известно, что определенные успехи достигнуты в наноструктурировании стальной проволоки и арматуры [1–4]. Для многих конструктивных материалов с целью повышения их служебных характеристик более целесообразно осуществлять наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение функциональных наноструктурных покрытий [5–12].

Достаточно широко используемые технологии нанесения тонкопленочных покрытий путем химического (Chemical Vapour Deposition — CVD) и физического (Physical Vapour Deposition — PVD) осаждений из газовой фазы требуют сложного дорогостоящего оборудования, предварительной многооперационной подготовки поверхности, высококвалифицированного обслуживающего персонала. Кроме того, габариты обрабатываемых изделий ограничены, процессы обработки достаточно длительны, прерывисты, энергозатратны, требуется приобретение дорогостоящих расходных мате-

риалов, реагентов, комплектующих и изнашиваемых элементов. После обработки в поверхностном слое изделий возникают растягивающие напряжения. В значительной мере лишен этих недостатков метод финишного плазменного упрочнения (ФПУ) [13].

Нанесение защитных покрытий может осуществляться также механическим способом [14, 15]. В работе [16] рассмотрены наноструктурирующая обработка металлических поверхностей и нанесение функциональных покрытий гибким инструментом — вращающимися проволочными щетками (ВПЩ). Поверхностные слои основы и наносимые частички материала покрытия подвергаются при такой обработке совместной интенсивной пластической деформации (ИПД). Этот процесс, названный фрикционным плакированием (ФП), реализуется на токарных, шлифовальных и других металлорежущих станках с использованием простой оснастки или ручных углошлифовальных машин (УШМ). Процесс ФП разработан в Магнитогорском государственном техническом университете и изучается уже три десятилетия [14–21]. Тем не менее метод ФП гибким инстру-

ментом представляет собой «научно-технологическую нишу» и требует дальнейших исследований.

Цель настоящей работы — изучение структуры, текстуры и микротопографии медьсодержащих покрытий и опыт их практического применения.

Материалы, оборудование, методика

Исследуемыми образцами служили пластины $3 \times 20 \times 100$ мм из стали марки 08. Покрытия на них наносили на плоскошлифовальном станке, на который вместо абразивного круга устанавливались ВПЩ и приспособление для подачи материала покрытия. Цилиндрические образцы (сталь марки 50) диаметром 20 мм обрабатывали на токарном станке, на суппорте которого размещалась специальная приставка [16] или простейшее приспособление с УШМ. Диаметр ВПЩ — 220 ± 290 мм, скорость вращения — 3000 ± 6000 об/мин, диаметр стальной проволоки ворса — $0,25 \pm 0,50$ мм, длина — 30 ± 40 мм. Материал для нанесения покрытия изготавливали в виде цилиндра диаметром 15–30 мм, который прижимался к ВПЩ с усилием 20–40 Н. Натяг (подача ВПЩ на обрабатываемое изделие) — 1 ± 4 мм, число проходов ВПЩ по обрабатываемой поверхности — 2 ± 9 . В качестве материала покрытия были использованы медь и латунь Л-63.

Для металлографических исследований использовали оптические микроскопы «Epiquant» (Carl Zeiss, Германия), «EpiType-2» (Carl Zeiss, Jena, Германия), IM7000 (Meiji Techno, Япония) и растворный электронный микроскоп (РЭМ) JSM-6490 LV (Jeol, Япония). Электронно-микроскопические исследования проведены методом реплик на электронном микроскопе «Tesla BC-613» (Tesla, Чехия).

Рентгеноструктурный анализ проводили на установке «Дрон-3» (НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург). После обработки был выполнен рентгенографический анализ ширины интерференционных линий {110}, {200} и {220} для материалов с ОЦК-решеткой и линий {111}, {200} и {311} для материалов с решеткой ГЦК. На тех же образцах одновременно осуществляли анализ кристаллографической текстуры поверхностных слоев. Преимущественные ориентировки определяли методами прямых (ППФ) и обратных (ОПФ) полюсных фигур.

Исследуемые образцы подвергали послойной электролитической полировке, позволяющей оценивать изменения тонкой структуры и кристаллографической текстуры на различном расстоянии

от поверхности. В процессе послойного стравливания деформированных слоев наряду с дифрактометрическими исследованиями производили контрольные съемки обратных лауэграмм. Съемки выполняли в камере КРОС в нефильтрованных излучениях Co и Fe.

Микротвердость определяли на приборах ПМТ-3 (ОАО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург) и «Buehler Micromet» (Buehler, Бельгия). Механические испытания осуществляли с помощью разрывной машины «Shimadzu» (Япония).

Исследования микротопографии поверхности проводили в лаборатории Научно-исследовательского центра «Микротопография» МГТУ им. Г.И. Носова на оптическом профилометре «Contour GT K1» (Bruker, Германия).

Результаты и их обсуждение

Медьсодержащие покрытия, нанесенные гибким инструментом, используются в основном в качестве антифрикционных в парах трения и могут также применяться при волочении, штамповке, при производстве биметалла. Изучение их структуры, текстуры и микротопографии имеет большое практическое значение при разработке технологии изготовления и рекомендаций по эксплуатации модифицированных изделий.

Исследование структуры и кристаллографической текстуры медного покрытия на стали. Металлографические исследования медного покрытия, нанесенного за 2 прохода ВПЩ на образце из стали марки 08кп в продольном и поперечном сечениях, показывают, что оно представляет собой конгломерат частиц и их скоплений. Четкие границы зерен, характерные для обычных металлических материалов, отсутствуют. Линии течения в направлении обработки весьма похожи на деформированную прокаткой структуру (рис. 1).

Специфика деформации, однако, такова, что линии течения в плоскости обработки не имеют строгой ориентации и непрерывной протяженности в одном направлении.

Установлено, что микротвердость покрытия составляет 6800 МПа, поверхностного слоя стальной основы — 4050 МПа, самой основы — 1950 МПа (среднее значение по 5 замерам при нагрузке 25 г).

Результаты электронно-микроскопического исследования структуры покрытия показаны на рис. 2 (косое сечение). Области, граничащие со стальной основой (слева на рис. 2, а), в большей ча-

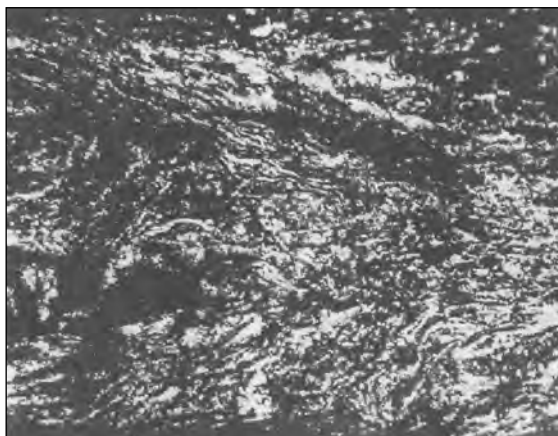


Рис. 1. Характер линий течения в медном покрытии ($\times 500$)

сти бесструктурны и имеют толщину 2,0–3,5 мкм. На расстоянии 2–3 мкм от поверхности раздела в структуре покрытия появляются участки с множеством дисперсных частиц (0,3–0,6 мкм) (рис. 2, б), среди которых могут встречаться и более крупные образования.

Анализ реплик, полученных с косо́го сечения, показывает неоднородность строения соседних участков слоя покрытия. Наиболее гомогенная структура возникает в слоях, непосредственно примыкающих к границе раздела сталь–покрытие. В подповерхностных и поверхностных слоях размер частиц укрупняется. При больших увеличениях можно наблюдать слияние отдельных частиц вследствие воздействия высокой температуры. Вообще, влияние температуры на структуру покрытия выражено явно слабее, чем это имело место в алюминиевом покрытии [15]. В промежуточных слоях видны оплавленные участки размером 3,5–6,0 мкм (рис. 2, в). В этих участках температура была значительно выше температуры рекристаллизации и, возможно, была близка к температуре плавления. Структура подповерхностных слоев покрытия представлена на рис. 2, г.

Кристаллографическая текстура медного покрытия. Кристаллографические текстуры стальной основы в исходном состоянии, ее же после травливания медного покрытия и самого покрытия

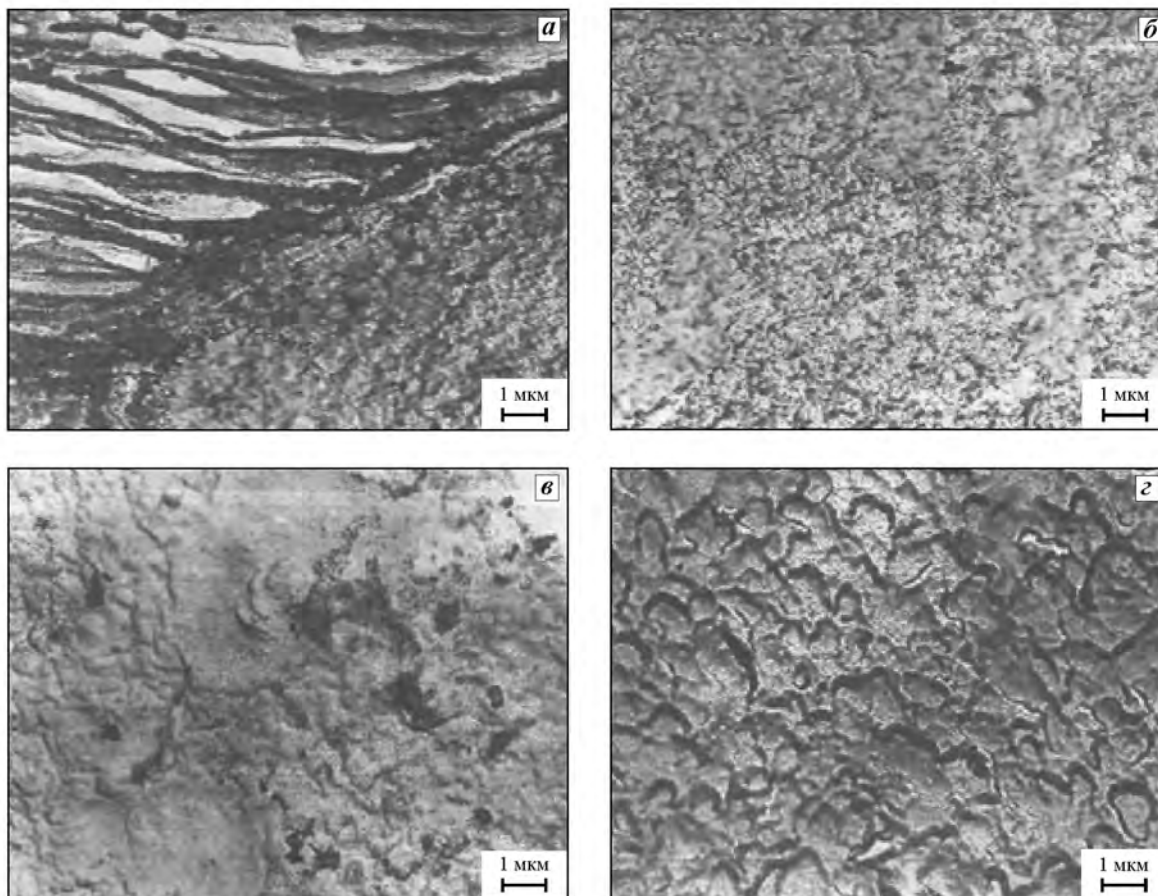


Рис. 2. Микроструктура медного покрытия в косо́м сечении ($\times 10000$)

приведены на рис. 3. Анализ ОПФ с плоскости обработки показывает, что в исходном состоянии сталь 08кп была практически не текстурирована (рис. 3, а). После обработки при нанесении покрытия за 2 прохода в материале основы возникает слабая текстура (110), параллельная направлению обработки, причем наиболее выражена в ней ориентировка {111}(110). Из рис. 3, в, видно, что текстура покрытия, нанесенного за 2 прохода,

практически полностью воспроизводит текстуру подложки. Увеличение числа проходов до 9 приводит к некоторому усилению текстуры основы (рис. 3, з). Текстура покрытия становится острее, чем после двух проходов, причем одновременно увеличивается рассеяние ориентировок вдоль всего пояса полюсов {100} → {111}. Упрочнение покрытия, нанесенного за 2 прохода, оказывается значительно большим, чем при нанесении его за

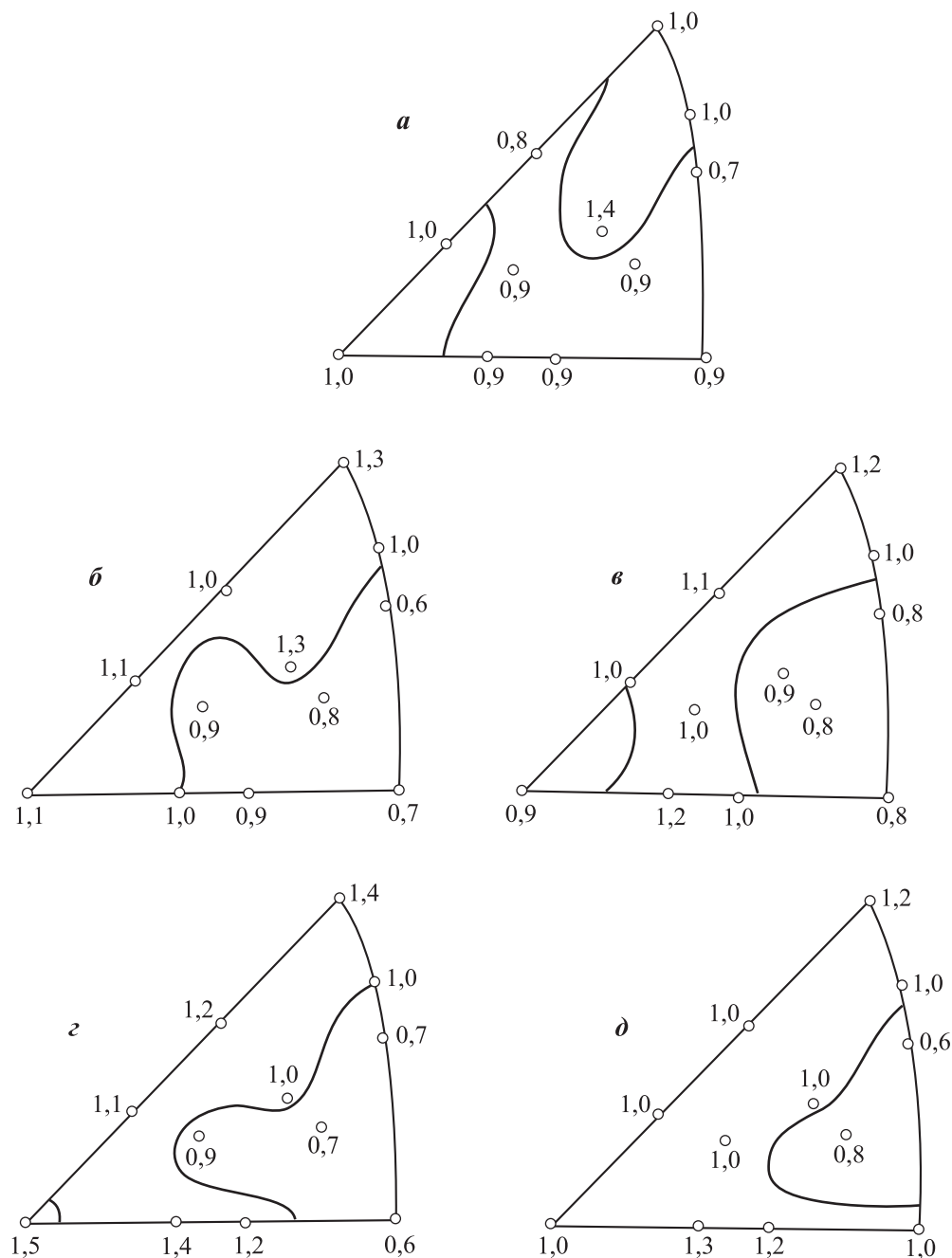


Рис. 3. Обратные полюсные фигуры

а – исходная сталь марки 08кп; б, з – сталь после обработки; в, д – медное покрытие при нанесении его за 2 (в) и 9 (д) проходов

9 проходов. Очевидно, что с увеличением толщины слоя покрытия деформационное упрочнение в его объеме уменьшается.

Исследование полуширин рентгеновских дифракционных линий покрытия в зависимости от числа проходов при его нанесении показали, что различные ориентировки деформированы практически одинаково (табл. 1).

Исследование микротопографии поверхности. Измерения и анализ шероховатости проводились по методике стандарта ГОСТ Р ИСО 25178 [22]. Были отобраны следующие параметры микротопографии поверхности:

S_a — среднее арифметическое отклонение выборки ординат поверхности, мкм;

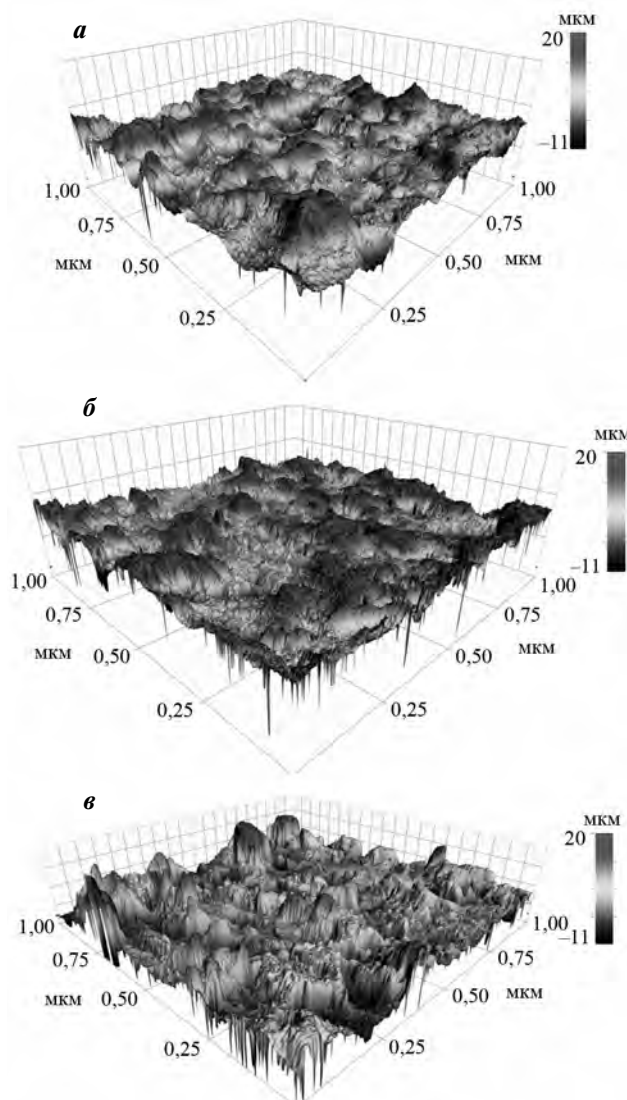


Рис. 4. Вид поверхности образца
 а — в отсутствие покрытия; б — после нанесения латуни;
 в — после нанесения меди

Таблица 1. Полуширины рентгеновских дифракционных линий медного покрытия, нанесенного на основу из стали 08кп за 2 и 9 проходов

Число проходов	Полуширина линии, 10^{-3} рад			
	{111}	{200}	{220}	{311}
2	4,42	3,56	2,73	3,01
9	3,91	3,14	2,42	2,76
Относительное изменение, %	+11,5	+11,8	+11,4	+8,3

S_{ku} — коэффициент эксцесса выборки ординат поверхности;

S_{sk} — коэффициент асимметрии выборки ординат поверхности;

$S_z = S_p + S_v$ — сумма максимальной высоты пиков (S_p) и максимальной глубины впадины (S_v), мкм;

S_{dq} — параметр, отображающий средний угол наклона микрограней шероховатой поверхности, град;

S_{dr} — показатель, характеризующий площадь шероховатой поверхности по отношению к площади гладкой номинальной поверхности, %;

S_{ds} — количество выступов на единицу площади, $мм^{-2}$;

S_{al} — автокорреляционная длина, мкм.

Результаты измерений представлены в табл. 2.

На рис. 4 показан вид поверхности образца до и после нанесения латунного и медного покрытий. Для более наглядной демонстрации изменений параметров шероховатости, обусловленных появлением покрытия, приведем диаграмму (рис. 5), в которой эти изменения показаны в виде столбцов процентного соотношения значений параметров до и после нанесения покрытия. Например, для параметра S_a :

$$\delta_{S_a} = \frac{S_{a_{\text{после}}} - S_{a_{\text{до}}}}{S_{a_{\text{после}}}} \cdot 100 \%$$

Анализ диаграммы (см. рис. 5) позволяет сделать следующие выводы:

1. Высотные параметры S_a , S_z для поверхности, покрытой латунью, разнонаправлены. Уменьшение S_a и незначительное увеличение S_z обусловлены тем, что латунное покрытие сглаживает исходную шероховатость образца, добавляя при этом некоторое количество мелких пиков.

2. Повышение параметра S_{ku} связано с перераспределением ординат профиля ближе к нулю, т.е. происходит нивелирование понятия «выступ» и «впадина». Однако снижение величины S_{sk} на 82 %

Таблица 2. Результаты измерений микрофотографии образцов до и после нанесения покрытий

Образец	S_a , мкм	S_{ku}	S_{sk}	S_z , мкм	S_{dq} , град	S_{dr} , %	S_{ds} , мм ⁻²	S_{al} , мкм
Исходный	1,10	3,03	-0,077	11,9	17	4,6	3460	70
Покрытый латунью	0,92	3,55	-0,439	12,9	20	6,2	3850	60
Покрытый медью	3,18	4,66	1,040	30,7	33	18,1	2463	62

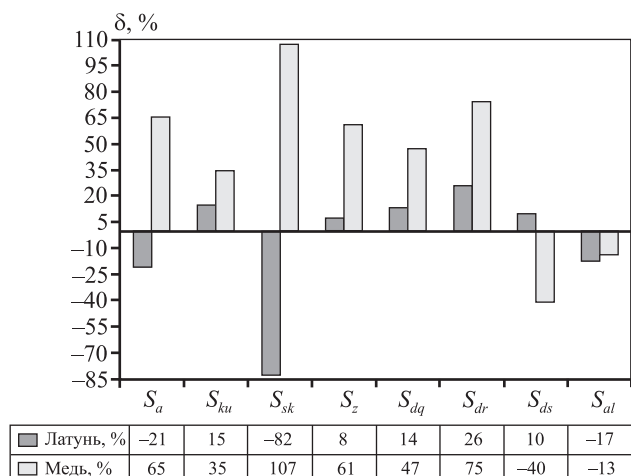


Рис. 5. Диаграмма процентного соотношения значений параметров микрофотографии поверхности образца до и после нанесения покрытия

в случае латунного покрытия указывает на смещение ординат в сторону «выступов».

3. Увеличение параметров S_{ds} и уменьшение S_a для латунного покрытия свидетельствуют о возрастании количества пиков на единицу площади, что с одновременным ростом угла S_{dq} и параметра S_{dr} указывает на более развитую текстуру поверхности после обработки и, следовательно, меньший износ в будущем [23]. Таким образом, латунное покрытие сглаживает исходную шероховатость поверхности, но исходную микрофотографию меняет незначительно.

4. Высотные характеристики S_a , S_z в случае медного покрытия значительно увеличиваются. Из факта повышения параметров S_{ku} и S_{sk} можно заключить, что с нанесением медного покрытия более четко различаются глубокие впадины и крупные, но одиночные выступы. Таким образом, покрытие медью формирует микрофотографию поверхности, существенно отличающуюся от исходной.

Заключение

Металлографические исследования медного покрытия на стали показали, что оно представляет

собой конгломерат частиц и их скоплений. Средняя толщина покрытия составляет 20–25 мкм, его микротвердость (~6800 МПа) в 3 раза превышает микротвердость стальной основы. Возможно, такое упрочнение покрытия возникает вследствие ИПД гибкими упругими элементами. На границе с основой частицы покрытия настолько мелки, что их форма не разрешается даже при очень больших увеличениях.

Кристаллографическая текстура покрытия воспроизводит текстуру материала основы несмотря на различные типы их кристаллических решеток.

Исследование микрофотографии поверхности образцов до и после нанесений покрытий показало, что латунное покрытие существенно сглаживает поверхность, но исходную микрофотографию меняет незначительно. Микрофотография поверхности медного покрытия существенно отличается от исходной.

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. Чукин М.В., Голубчик А.Г., Корчунов А.Г., Полякова М.А., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Емалева Д.Г., Гулин А.Е., Константинов Д.В., Кузнецова А.С. Адаптивные подходы к конструированию технологических процессов и управлению качеством металлопродукции. СПб.: Питер, 2016.
2. Chukin M., Korchunov A., Polyakova M., Emaleeva D. Forming ultrafine-grain structure in steel wire by continuous deformation // Steel in Transl. 2010. No. 40 (6). P. 595–597.
3. Polyakova M., Calliari I., Gulini A. Effect of microstructure and mechanical properties formation of medium carbon steel wire through continuous combined deformation // Key Eng. Mater. 2016. Vol. 716. P. 201–207.
4. Chukin M.V., Polyakova M.A., Gulini A.E. Influence of hybrid plastic deformation on the microstructure and

- mechanical properties of carbon-steel wire // *Steel in Transl.* 2016. Vol. 46. No. 8. P. 548—551.
5. *Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В.* Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. Томск: Томск. политехн. ун-т, 2008.
 6. *Voevodin A.A., Shtansky D.V., Levashov A.E., Moore J.J.* Nanostructured thin films and nanodispersion strengthened coatings. Springer, 2005.
 7. *Каблов Е.А., Мубояджан С.А., Луценко А.Н.* Наноструктурные ионоплазменные защитные и упрочняющие покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // *Вопр. материаловедения.* 2008. No. 2 (54). С. 175—186.
 8. *Жетесова Г.С., Жукова А.В., Жунусбеков Д.С., Плешакова Е.А.* Технология нанесения наноструктурных многофункциональных покрытий на детали // *Международ. журн. эксперим. образования.* 2012. No. 10. С. 36—38.
 9. *Коган Б.И., Майтаков А.Н.* Применение и оценка эффективности наноструктурных материалов для повышения надежности рабочих элементов пищевых машин // *Вестн. Кузбасского гос. техн. ун-та.* 2009. No. 6. С. 84—85.
 10. *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.
 11. *Li W.L., Tao N.R., Lu K.* Fabrication of a gradient nano-micro-structured surface layer on bulk copper by means of a surface mechanical grinding treatment // *Scr. Mater.* 2008. Vol. 59. P. 546—549.
 12. *Leyland A., Matthews A.* On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimized tribological behavior // *Wear.* 2000. Vol. 246. P. 1—11.
 13. *Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А.* Плазменные технологии: Рук-во для инженеров. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.
 14. *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.
 15. *Белевский Л.С.* Нанесение защитных металлических покрытий механическим способом // *Защита металлов.* 1988. Т. 24. No. 2. С. 323—325.
 16. *Белевский Л.С.* Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом. Магнитогорск: Лицей РАН, 1996.
 17. *Анциупов В.П., Белов В.К., Савельев В.Б.* Исследование параметров поверхностного слоя при деформационном плакировании гибким инструментом // *Трение и износ.* 1995. Т. 15. No. 2. С. 212—217.
 18. *Анциупов В.П.* Теория и практика плакирования гибким инструментом. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999.
 19. *Завалицин А.Н., Смирнов О.М., Тулупов С.А.* Модификация поверхности металлических изделий с использованием покрытий. М.: Орбита-М, 2012.
 20. *Платов С.И., Дема Р.Р., Зотов А.В.* Модель формирования толщины плакированного слоя на деталях пар трения технологического оборудования // *Вестн. МГТУ им. Г.И. Носова.* 2013. No. 1. С. 69—73.
 21. *Леванцевич М.А., Максименко Н.Н.* Улучшение эксплуатационных характеристик деталей поверхностным модифицированием методом плакирования гибким инструментом // *Упрочн. технологии и покрытия.* 2015. No. 10. С. 16—20.
 22. ISO/TR 25178:2012. Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal-terms, definitions and surface texture parameters.
 23. *Poon C.Y., Sayles R.S.* The classification of rough surface contacts in relation to tribology // *J. Phys. D.* 1992. Vol. 25. No. 1A. P. A249—A256.

References

1. *Chukin M.V., Golubchik A.G., Korchunov A.G., Polyakova M.A., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Emaleeva D.G., Gulin A.E., Konstantinov D.V., Kuznetsova A.S.* Adaptive podkhody k konstruirovaniyu tekhnologicheskikh protsessov i upravleniyu kachestvom metalloproduktcii [Adaptive approaches to designing technological processes and quality control of steel products]. Saint Petersburg: Piter, 2016.
2. *Chukin M., Korchunov A., Polyakova M., Emaleeva D.* Forming ultrafine-grain structure in steel wire by continuous deformation. *Steel in Transl.* 2010. No. 40 (6). P. 595—597.
3. *Polyakova M., Calliari I., Gulin A.* Effect of microstructure and mechanical properties formation of medium carbon steel wire through continuous combined deformation. *Key Eng. Mater.* 2016. Vol. 716. P. 201—207.
4. *Chukin M.V., Polyakova M.A., Gulin A.E.* Influence of hybrid plastic deformation on the microstructure and mechanical properties of carbon-steel wire. *Steel in Transl.* 2016. Vol. 46. No. 8. P. 548—551.
5. *Panin V.E., Sergeev V.P., Panin A.V.* Nanostrukturirovanie poverkhnostnykh sloev konstruksionnykh materialov i nanesenie nanostrukturnykh pokrytii [The nanostruc-

- turing of the surface layers of constructional materials and application of nanostructured coatings]. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii un-t, 2008.
6. Voevodin A.A., Shtansky D.V., Levashov A.E., Moore J.J. Nanostructured thin films and nanodispersion strengthened coatings. Springer, 2005.
 7. Kablov E.A., Muboyadzhan S.A., Lutsenko A.N. Nanostrukturnye ionoplazmennye zashchitnye i uprochnyayushchie pokrytiya dlya lopatok gazoturbinnnykh dvigatelei [Nanostructured ion-plasma protective and strengthening coatings for blades of gas turbine engines]. *Voprosy materialovedeniya*. 2008. No. 2 (54). P. 175—186.
 8. Zhetesova G.S., Zhukova A.V., Zhunusnekov D.S., Pleshakova E.A. Tekhnologiya naneseniya nanostrukturnykh mnogofunktional'nykh pokrytii na detali [Technology of applying of nanostructured multifunctional coating for details]. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*. 2012. No. 10. P. 36—39.
 9. Kogan B.I., Maitakov A.N. Primenenie i otsenka effektivnosti nanostrukturnykh materialov dlya povysheniya nadezhnosti rabochikh elementov pishchevykh mashin [Application and efficiency evaluation nanostructured materials to improve the reliability of the working elements of food machines]. *Vestnik Kuzbasskogo gosud. tekhn. un-ta*. 2009. No. 6. P. 84—85.
 10. 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.
 11. Li W.L., Tao N.R., Lu K. Fabrication of a gradient nano-micro-structured surface layer on bulk copper by means of a surface mechanical grinding treatment. *Scr. Mater.* 2008. Vol. 59. P. 546—549.
 12. Leyland A., Matthews A. On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimized tribological behavior. *Wear*. 2000. Vol. 246. P. 1—11.
 13. Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topolyanskii P.A. Plazmennye tekhnologii: Rukovodstvo dlya inzhenerov [Plasma technologies: Guide for engineers]. Saint Petersburg: Izdatel'stvo politekhnicheskogo un-ta, 2008.
 14. Belevskii L.S., Belevskaya I.V., Efimova Yu.Yu. Friktsionnaya nanostrukturiruyushchaya obrabotka metallicheskih poverkhnostei i nanesenie funktsional'nykh pokrytii gibkim instrumentom [Friction nanostructuring treatment of metallic surfaces and deposition of functional coatings using a flexible tool]. *Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2014. No. 1. P. 70—76.
 15. Belevskii L.S. Nanesenie zashchitnykh metallicheskih pokrytii mekhanicheskim sposobom [Application of protective metal coatings by mechanical technology]. *Zashchita metallov*. 1988. Vol. 24. No. 2. P. 323—325
 16. Belevskii L.S. Plasticheskoe deformirovanie poverkhnostnogo sloya i formirovanie pokrytiya pri nanesenii gibkim instrumentom [Plastic deformation of the surface layer and the formation of the coating applied by flexible tool]. Magnitogorsk: Litsei RAN, 1996.
 17. Antsupov V.P., Belov V.K., Savel'ev V.B. Issledovanie parametrov poverkhnostnogo sloya pri deformatsionnom plakirovanii gibkim instrumentom [Investigation of the parameters of the surface layer under deformation cladding by a flexible tool]. *Trenie i iznos*. 1995. Vol. 15. No. 2. P. 212—217.
 18. Antsupov V.P. Teoriya i praktika plakirovaniya gibkim instrumentom [Theory and practice of cladding by flexible tool]. Magnitogorsk: MGTU im. G.I. Nosova, 1999.
 19. Zavalishchin A.N., Smirnov O.M., Tulupov S.A. Modifikatsiya poverkhnosti metallicheskih izdelii s ispol'zovaniem pokrytii [Surface modification of metal products by coatings]. Moscow: Orbita-M, 2012.
 20. Platov S.I., Dema R.R., Zotov A.V. Model' formirovaniya tolshchiny plakirovannogo sloya na detalyakh par treniya tekhnologicheskogo oborudovaniya [The model of formation of a clad layer thickness on the details]. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2013. No. 1. P. 69—72.
 21. Levantsevich M.A., Maksimenko N.N. Uluchshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik detalei poverkhnostnym modifitsirovaniem metodom plakirovaniya gibkim instrumentom [Improvement of operating characteristics of parts by surface modification by cladding method by flexible tool]. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2015. No. 10. P. 16—20.
 22. ISO/TR 25178:2012. Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal-terms, definitions and surface texture parameters.
 23. Poon C.Y., Sayles R.S. The classification of rough surface contacts in relation to tribology. *J. Phys. D*. 1992. Vol. 25. No. 1A. P. A249—A256.