

8. Takeda K. // Surf. Coat. Technol. 2000. Vol. 131. P. 234.
9. Васильев М. А., Панарин В. Е., Ткачук А. А. // Металлофизика и новейшие технологии. 2000. Т. 22, № 11. С. 58.
10. Береснев В. М., Толок В. Т., Гриценко В. И. // Физ. инженерия пов-ти. 2004. Т. 1, № 3-4. С. 237.
11. Демиденко В. В., Потемкин Г. В., Старостин Г. Т. и др. // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2010. № 2. С. 26.
12. Демиденко В. В., Потемкин Г. В., Ремнев Г. Е. и др. // Физика и химия обраб. материалов. 2010. № 5. С. 43.
13. Мовчан Б. А., Демчишин А. В. // Физика металлов и металлосоединение. 1969. Вып. 28, № 4. С. 23.
14. Тимофеева Л. А., Катрич С. А. // Технология и орг. пр-ва. 1991. № 2. С. 53.
15. Борисов Д. П., Гончаренко И. М., Коваль Н. Н. и др. // Физика и химия обраб. материалов. 1997. № 4. С. 40.
16. Бецофен С. Я., Петров Л. М., Лазарев Э. М., Коротков Н. А. и др. // Металлы. 1990. № 3. С. 158.
17. Лозован А. А. // Технол. машиностроения. 2007. № 9. С. 36.
18. Матвеев Н. В. // Свароч. пр-во. 2003. № 4. С. 15.
19. Семенов А. П. // Трение и износ. 1994. Т. 15, № 5. С. 770.
20. Sekler J., Steinmann P. A., Hintermann H. E. // Surf. Coat. Technol. 1988. Vol. 36, № 1-2. P. 519.

УДК 621.81

ФРИКЦИОННАЯ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И НАНЕСЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ГИБКИМ ИНСТРУМЕНТОМ

© 2014 г. **Л. С. Белевский, И. В. Белевская, Ю. Ю. Ефимова**

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

Статья поступила в редакцию 26.04.2013 г., доработана 20.05.2013 г., подписана в печать 23.05.2013 г.

Л. С. Белевский – докт. техн. наук, профессор кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования МГТУ им. Г. И. Носова (455000, г. Магнитогорск, пр-т Ленина, 38). Тел.: (351) 909-76-79. E-mail: l.belevskiy@mail.ru.

И. В. Белевская – аспирант этой кафедры. E-mail: belirena@yandex.ru.

Ю. Ю. Ефимова – канд. техн. наук, доцент кафедры металлургических и машиностроительных технологий этого вуза. E-mail: jefimova78@mail.ru.

Исследована возможность наноструктурирования поверхностей металлических изделий гибким упругим инструментом (вращающимися проволочными щетками – ВПЩ). Установлено, что при определенных режимах обработки на поверхности образуется тонкий слой аморфизированного материала и формируется текстура, наиболее острая в поверхностных слоях. Одновременно с упрочнением поверхностного слоя ВПЩ можно наносить функциональные покрытия различного назначения толщиной от 3–5 до 40–45 мкм.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, фрикционное плакирование, наноструктура, аморфный слой, текстура, гибкий инструмент.

An opportunity of metal product surface nanostructure formation with flexible tool (rotating wire brushes) has been examined. It is established that at certain surface processing conditions a thin amorphized layer evolves and the most acute in surface layers texture is formed. Function coatings of different function with width of 3–5 ÷ 40–45 μm can be applied simultaneously with surface layer hardening with rotating wire brush.

Key words: surface hardening, friction coating, amorphous layer, nanostructure, texture, flexible tool.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы большое внимание уделяется поверхностному наноструктурированию и его влиянию на служебные свойства изделия, в том числе механические. В работе [1] обосновывается концепция, согласно которой поверхностный

слой является самостоятельной подсистемой, в сильной степени влияющей на локализацию пластического течения и разрушения материала. Для наноструктурирования поверхности могут быть использованы различные методы интенсивной пластической деформации, в том числе фрикционные [2, 3]. Одним из способов формирова-

ния на стальных поверхностях функциональных нанокристаллических слоев является обработка скользящими инденторами [4]. Она может производиться в условиях трения скольжения, исключая нагрев поверхностей трения, или, наоборот, с нагревом поверхности от трения индентора и от действия электрического тока (ЭМО – электрохимическая обработка) [5]. К фрикционной обработке относится и нанесение покрытий путем трения прутка из латуни или меди о поверхность детали [6].

Предлагается использовать для модификации поверхности гибкий инструмент – вращающиеся проволочные щетки (ВПЩ), которые давно применяются для очистно-упрочняющей обработки в различных областях техники [7–9], в том числе и для нанесения покрытий [10]. Теоретические и экспериментальные исследования процесса пластического деформирования поверхностного слоя и нанесения покрытий гибким инструментом начались в Магнитогорском техническом университете в 1986 г. [11, 12]. Несмотря на большое количество работ, выполненных в последующие годы [13–16], процесс, названный нами фрикционным плакированием (ФП), изучен явно недостаточно, что сдерживает его более широкое и эффективное использование в различных областях техники.

Цель настоящей работы – изучение возможностей фрикционной обработки гибким инструментом для наноструктурирования поверхностного

слоя и нанесения функциональных покрытий, исследование структуры, состава и свойств поверхностного слоя и покрытий.

МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, МЕТОДИКА

При металлографическом исследовании поверхностных слоев в качестве изучаемых образцов использовали пластины $3 \times 20 \times 100$ мм из сталей марок 08, 45. Покрытия наносили на плоскошлифовальном станке, на который вместо абразивного круга устанавливали ВПЩ и приспособление для подачи материала покрытия. Цилиндрические образцы (сталь 20) диаметром 20 мм обрабатывали на токарном станке, на суппорте которого располагалась специальная приставка [13]. Диаметр ВПЩ 220–290 мм, скорость вращения 3 тыс. об/мин, диаметр стальной проволоки ворса 0,25–0,30 мм, длина 30–40 мм. Материал для нанесения покрытия изготавливали в виде прутка диаметром 20 мм, который прижимался к ВПЩ с усилием 20–40 Н. Натяг (величина подачи ВПЩ на обрабатываемое изделие) $N = 1 \div 4$ мм, число проходов ВПЩ по обрабатываемой поверхности $n = 2 \div 15$.

Материалом покрытия служили алюминий и латунь Л-63. Для изучения пластической деформации при обработке металлических поверхностей гибкими упругими элементами использова-

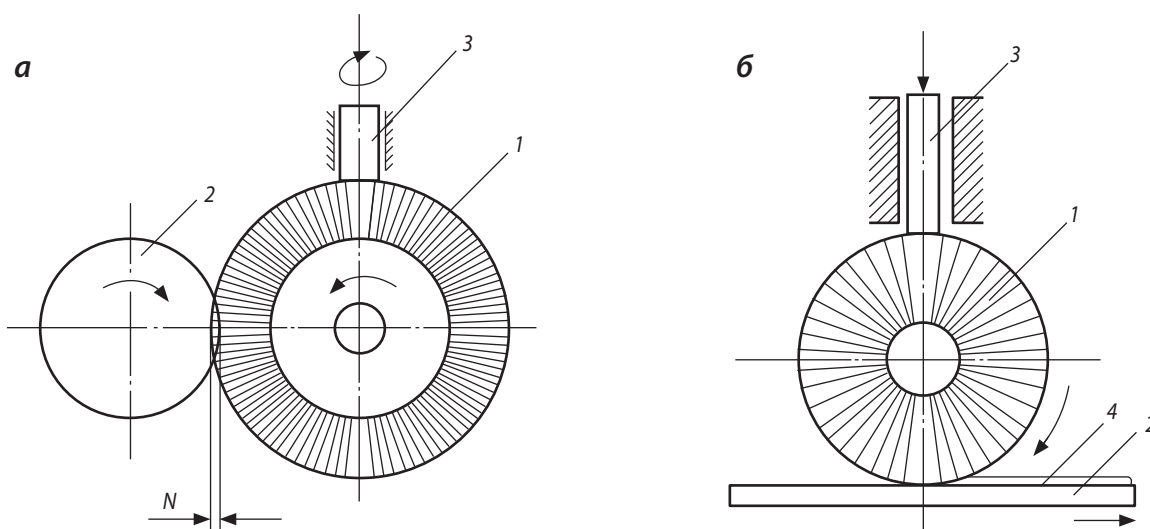


Рис. 1. Схема нанесения покрытия на цилиндрическую (а) и плоскую (б) поверхности изделия методом фрикционного плакирования

1 – гибкий инструмент (ВПЩ); 2 – обрабатываемое изделие; 3 – заготовка из материала покрытия; 4 – слой покрытия; N – натяг

лись также монокристаллы W, Mo в виде прутков диаметром 30 мм и сплав Fe + 3 % Si (электротехническая сталь в виде полосы толщиной 0,5 мм, размер зерен 25–40 мм). Исходные ориентировки монокристаллических образцов и отдельных зерен сплава Fe + 3 % Si определяли методом обратной съемки по Лауэ в Co- и Fe-излучении. Исследуемые образцы подвергали послойной электролитической полировке, позволяющей оценивать изменения тонкой структуры и кристаллографической текстуры на различном расстоянии от поверхности.

Поверхность изучали на стереомикроскопе «Meiji Techno». Для металлографических исследований применяли оптические микроскопы «Эпиквант», «Ертур-2», «Meiji Techno» и растровый электронный микроскоп РЭМ JSM-6490 LV. Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) проводили с использованием приставки «Oxford», рентгеноструктурный – на установке ДРОН-3. Микротвердость определяли на приборах ПМТ-3 и «Buehler Micromet».

Схема нанесения покрытий методом ФП представлена на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На плоских и цилиндрических образцах было установлено, что при постоянных параметрах инструмента толщина и структура деформированного слоя основы и покрытия существенно зависят от числа проходов (n) инструмента по образцу, величины натяга (N), скорости обработки, материала основы и других факторов. В таблице приведены значения микротвердости поверхности различных материалов после обработки ВПЩ. На рис. 2 показана микроструктура поверхностных слоев сталей марок 08Ю, 45 после обработки ВПЩ. Наибольшие изменения в структуре и максимальная толщина пластически деформирован-

ного поверхностного слоя имеют место в наиболее мягкой стали 08Ю (рис. 2, а) и в меньшей степени – в стали 45 (рис. 2, б).

Определено, что при всех режимах обработки наблюдается значительное упрочнение поверхностного слоя. В зависимости от материала основы поверхностная деформация сосредотачивается в поверхностных слоях толщиной 0,04–0,14 мм.

Общая для монокристаллических материалов с ОЦК-решеткой картина изменения рентгенограмм, полученная в результате съемок по Лауэ при последовательном стравливании деформированного слоя, показана на рис. 3 на примере образца W. Анализ послойных рентгенограмм позволяет выявить следующие особенности. На поверхности всех исследованных монокристаллов формируется слой материала с беспорядочной ориентировкой, о чем свидетельствует появление на рентгенограммах сплошных колец (рис. 3, а). Текстурные максимумы различной интенсивности на фоне сплошных колец определяют наличие поверхностного слоя с явно выраженной текстурой. Полученные качественные результаты позволяют заключить, что толщина упрочненного деформирующей обработкой слоя и возникающие в нем преимущественные ориентировки носят явно анизотропный характер. Для оценки влияния этих факторов были проведены количе-

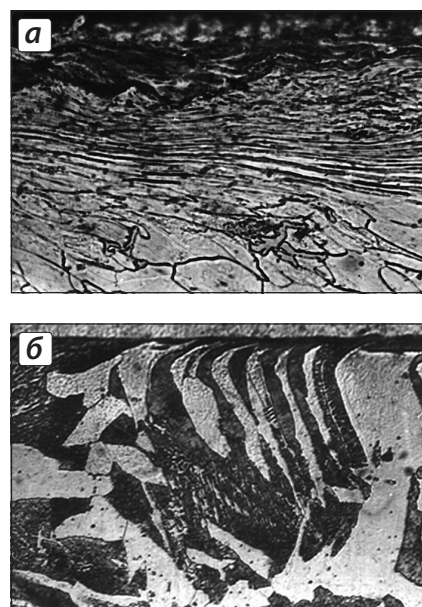


Рис. 2. Микроструктура ($\times 800$) поверхностных слоев сталей после обработки ВПЩ ($N = 1$ мм, $n = 10$)

а – сталь 08Ю; б – сталь 45

Микротвердость (МПа, нагрузка 50 г) поверхности различных материалов после обработки ВПЩ ($N = 1$ мм, $n = 5$)

Материал	Сталь			Mo	W
	08кп	45	ШХ-15 (закал.)		
До обработки	1160	2360	6100	2150	4430
После обработки	1750	3260	6120	2950	5500

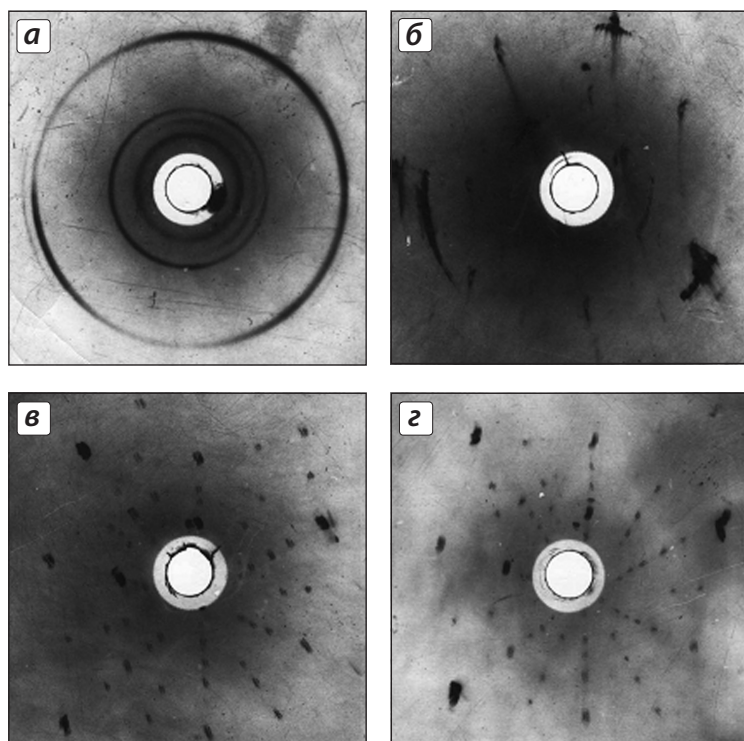


Рис. 3. Характер изменения рентгенограмм по Лауэ монокристаллов W, обработанных ВПЩ, по глубине деформированного слоя в результате стравливания с шагом 0,02 мм

ственные исследования изменений полуширин рентгеновских интерференционных линий и характера возникающих преимущественных ориентировок. Известно, что в поверхностных слоях при трении возможно образование материала с аморфной структурой [17]. Этого нельзя исключить и в настоящем эксперименте: как показывают съемки по Лауэ, уровень диффузного фона при съемке поверхностного слоя – особенно образцов W и Mo и в меньшей степени для Fe + 3 % Si – достаточно высок и резко уменьшается при стравливании с поверхности слоя толщиной 0,01 мм. Анализ лауэграмм всех обработанных ВПЩ материалов свидетельствует, что на поверхности исходных монокристаллических образцов всех ориентаций образуется слой неориентированного материала большей или меньшей толщины со следами текстурных максимумов или без них. Тип и степень остроты возникающей в материале текстуры в процессе обработки его ВПЩ позволили выяснить анализ обратных и прямых полюсных фигур.

Определены искажения кристаллической решетки и текстура материалов с поликристаллической структурой. Результаты получены при обработке ВПЩ низкоуглеродистой стали и поликристаллического алюминия. Как показали исследования, смещение максимумов отдельных

ориентировок аксиальной текстуры всегда происходит путем вращения кристаллов отдельных ориентаций $\{hkl\}$ вокруг направления обработки, в результате деформации сдвигом. Этот экспериментальный факт является дополнительным косвенным подтверждением того, что высокая прочность и большие искажения в поверхностных слоях обработанных ВПЩ образцов должны определяться тонкой структурой, возникающей в процессе сдвиговой деформации. При этом в полосе деформации сохраняется малоискаженная структура с низкой плотностью дислокаций, а главный вклад в повышение прочности и износостойкости вносят дислокации, образующие стенки фрагментов и обуславливающие их значительную разориентировку. Увеличение внутризеренной разориентировки значительно сильнее влияет на возрастание прочности и сопротивление износу, чем просто повышение плотности дислокаций во всем объеме деформируемых зерен, причем с увеличением прочности материала с такой структурой в минимальной степени снижается пластичность, что подтверждается данными, приведенными в работе [17].

Толщина покрытий из металлов и сплавов с относительно низкой температурой плавления зависит от режима обработки, исходной шероховатости поверхности и ряда других факторов.

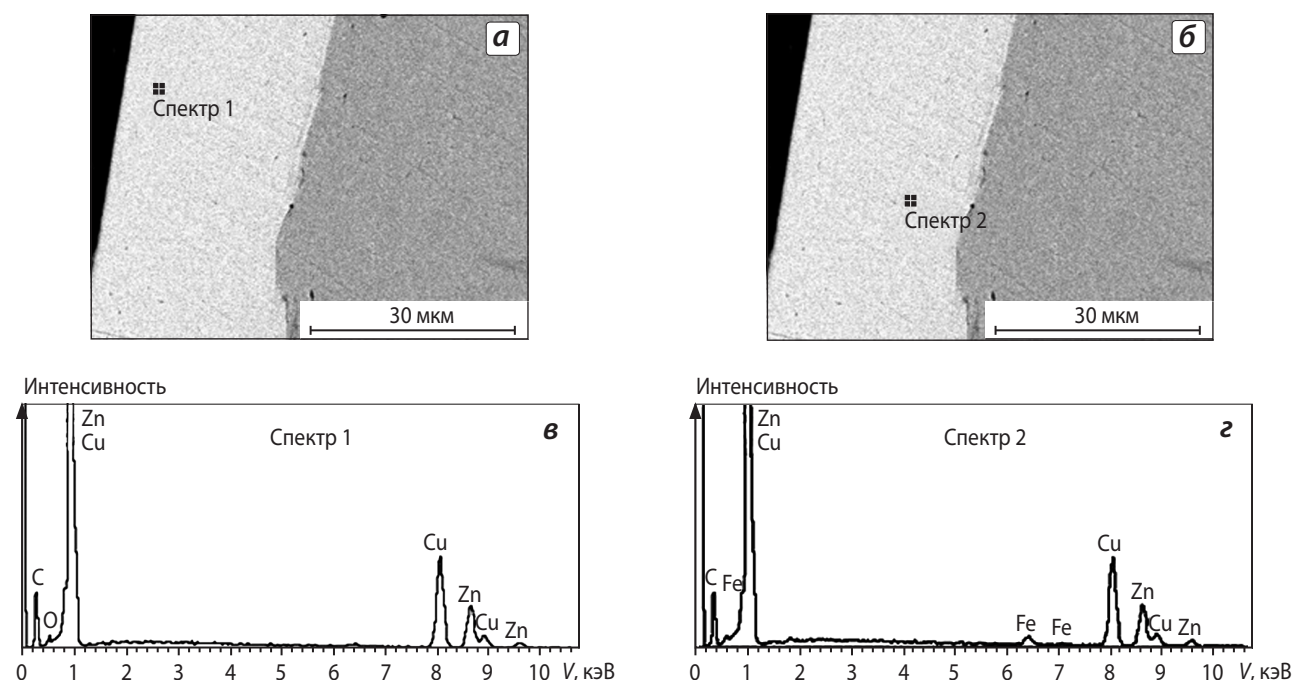


Рис. 4. Латунное покрытие на образце из стали 20

а – верхний слой покрытия; **б** – слой, прилегающий к основе; **в, г** – характеристические спектры в анализируемых участках

Минимальная толщина алюминиевого и латунного покрытий в наших экспериментах составляла 10–12 мкм, максимальная – 40–45 мкм. На рис. 4 показаны общий вид латунного покрытия на стали 20 и результаты МРСА в верхнем слое покрытия (рис. 4, **а**) и слое, прилегающем к основе (рис. 4, **б**). Как следует из рис. 4, покрытие толщиной ~ 30 мкм – сплошное, однородное, состоит из латуни с незначительным количеством железа, которое может попадать в покрытие с поверхности основы или ворса ВПЩ. На рис. 5 показан вид поверхности образца перед нанесением покрытия ($R_a = 0,495$ мкм), а на рис. 6 – поверхность латунного покрытия ($R_a = 0,1$ мкм).

Электронно-микроскопические исследования проведены методом реплик при увеличениях $(7 \div 30) \cdot 10^3$. Изучали структуры поперечных и косых сечений покрытия. Была исследована структура алюминиевого покрытия на стали 08 кп. Толщина слоя с мелкодисперсными частицами на границе раздела сталь–покрытие составляет ~ 0,4 мкм (рис. 7, **а**), и частицы настолько малы, что не разрешаются при увеличении до $25 \cdot 10^3$. В следующем слое приблизительно такой же толщины в однородной матрице беспорядочно распределены частицы размером 0,03–0,15 мкм (рис. 7, **б**). Далее следуют слои, различия структуры в которых незначи-

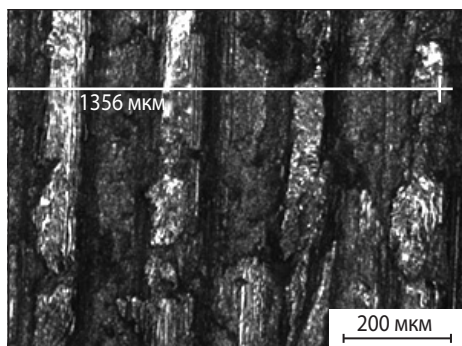


Рис. 5. Вид поверхности образца перед нанесением покрытия (стерео)

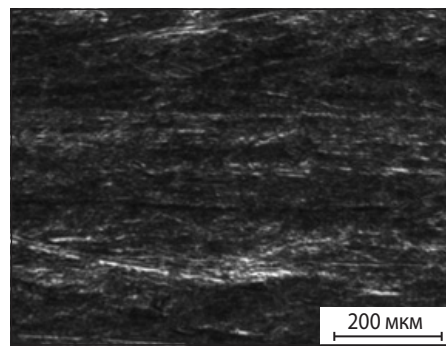


Рис. 6. Поверхность латунного покрытия (стерео)

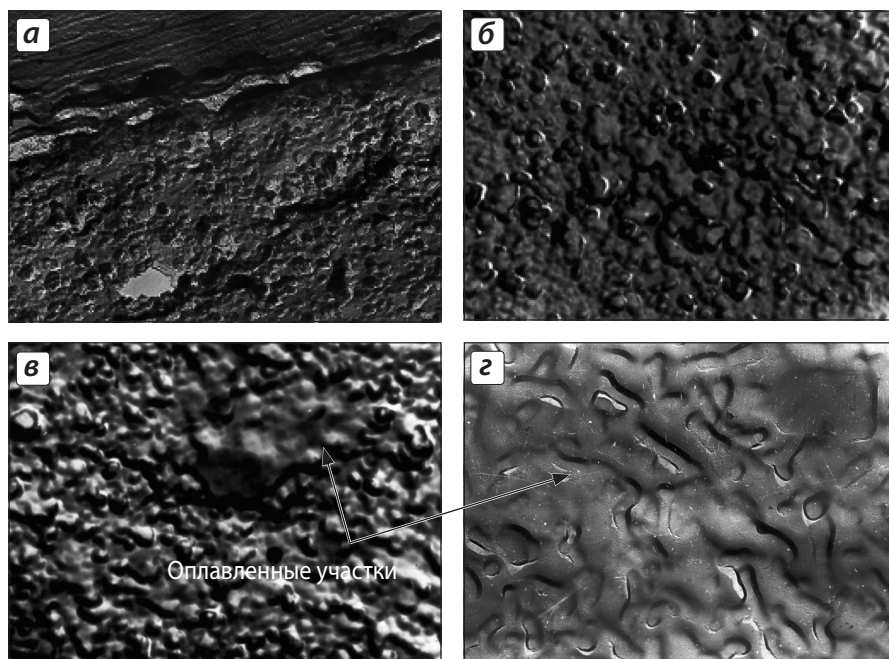


Рис. 7. Панорамная структура алюминиевого покрытия от границы раздела сталь–покрытие (а) до края покрытия (г) Поперечное сечение (x25000)

тельны (рис. 7, в, г), местами в покрытии встречаются оплавленные участки.

Были проведены электронно-микроскопические исследования латунного покрытия, нанесенного на сталь. При анализе его структуры были установлены в целом те же закономерности, что и для алюминиевого. Из рис. 8 очевиден кристаллографически ориентированный характер частиц покрытия как в соседних микрообластях, так и внутри одной и той же микрообласти. Изучение топологии частиц показывает, что в разделенных между собой четко выраженной границей микроучастках покрытия (см. рис. 8, а) кубические кристаллы имеют по плоскости залегания разориентировку не более чем 10 град и могут быть описаны как $\{110\}$ и $\{230\}$. В отличие от разориентировки по плоскости, разориентировка по направлению в различных микроучастках может отличаться очень существенно. Например, на рис. 8, а в области фрагмента, не имеющего гра-

ниц раздела, частицы покрытия строго фиксированы по плоскости $\{100\}$, но разориентировка по направлению достигает при этом 70 град. Анализ данных электронно-микроскопического исследования свидетельствует, что при нанесении покрытия в нем возникает аксиальная текстура типа $\{hko\}$. Характер деформации частиц, приводящий к возникновению такой текстуры, хорошо виден на рис. 8, б, иллюстрирующем сдвиговую деформацию частиц гибким инструментом.

Слой покрытия на поверхности основы формируется следующим образом. При первом проходе происходят очистка поверхности основы от оксидных пленок и загрязнений, срезание микронеровностей, обнажение ювенильных поверхностей и образование мостиков схватывания между основой и частичками материала покрытия, доставляемыми в зону обработки концами ворсинок инструмента. Схватыванию способствуют совместная пластическая деформация и высокие

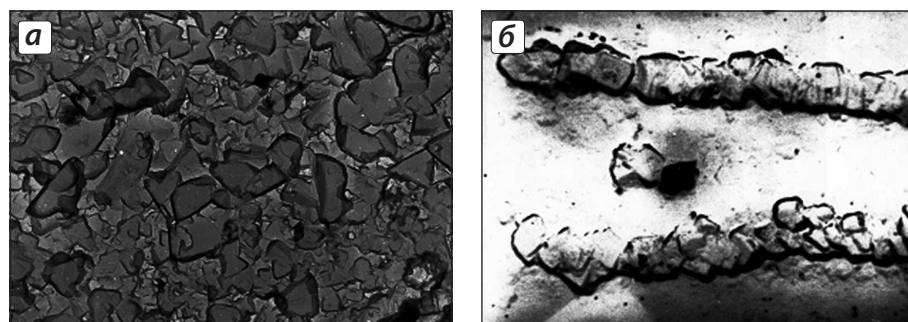


Рис. 8. Ориентированное расположение частиц латунного покрытия в отдельных микрообластях (x10000)

температуры в зоне обработки. Особенно благоприятны сдвигающие усилия, возникающие при проскальзывании ворсинок с частичками материала покрытия по поверхности изделия. Происходит «перемешивание» материалов основы и покрытия, что приводит к образованию слоистой переходной зоны на границе основа–покрытие. Несмотря на кратковременность обработки, в некоторых участках успевают пройти диффузионные процессы, поэтому местами мы наблюдаем «размытую» границу. Прочность сцепления покрытия с основой определялась адгезиометром отрывного типа «Posi Test AT» и составляла в среднем 20 МПа. Она может быть увеличена за счет термической обработки или предварительного подогрева основы.

Размеры кристаллитов алюминиевого и латунного покрытий не превышают 100 нм, что подтверждается также данными работы [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При обработке гибким инструментом всех исследуемых материалов наблюдаются упрочнение поверхностного слоя и образование текстуры, причем наиболее острая текстура формируется в поверхностных слоях.

Экспериментально установлено, что при обработке ВПЩ на поверхности возникает тонкий слой аморфизированного материала, и наиболее четко это проявляется в материалах с высокой температурой плавления, особенно у вольфрама. На границе с основой частицы покрытия настолько мелки, что форма их не разрешается даже при очень больших увеличениях. Размеры кристаллитов алюминиевого и латунного покрытий не превышают 100 нм. Вышеизложенное дает основание полагать, что при определенных режимах обработки гибким инструментом можно получать на поверхности наноструктурированные или даже аморфизированные слои и наносить функциональные покрытия.

При фрикционной обработке поверхности или при нанесении покрытий гибким инструментом методом ФП могут использоваться токарные или

шлифовальные станки, оборудованные несложными приставками. Возможна также обработка винтовых поверхностей и зубчатых колес [18], крупногабаритных деталей. Обработка поверхности и нанесение покрытий гибким инструментом – это простой, технологичный, дешевый и экологически чистый процесс, который должен найти более широкое применение в машиностроении и металлургии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панин В. Е., Панин А. В. // Физ. мезомеханика. 2005. Т. 8, № 5. С. 7.
2. Чукин М. В., Корчунов А. Г., Голубчик Э. М. и др. // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. 2012. № 4. С. 61.
3. Макаров А. В., Коршунов Л. Г. // Изв. вузов. Физика. Т. 24, № 3. С. 301.
4. Макаров А. В., Поздеева Н. А., Малыгина И. Ю. // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 5. С. 32.
5. Аскинази Б. М. Упрочнение и восстановление деталей электрохимической обработкой. Л.: Машиностроение, 1977.
6. А.с. 115744 (РФ). Способ придания поверхности металлов трущихся пар противозадирных свойств / Д. Н. Гаркунов, В. И. Лозовский. 1958.
7. Перепичка Е. В. Очистно-упрочняющая обработка изделий щетками. М.: Машиностроение, 1989.
8. Кургузов Ю. И., Папшев Д. Д. // Вестн. машиностроения. 1986. № 4. С. 54.
9. Проскуряков Ю. Г., Еришов В. С. // Исследование технологических процессов упрочняющекалибрующей и формообразующей обработки металлов: Межвуз. сб. Ростов-на-Дону: Инст-т сельскохоз. машиностроения, 1970. С. 144.
10. А.с. 57162 (СССР). Способ нанесения металлических покрытий / А. А. Абиндер. 1940.
11. А.с. 1206068 (СССР). Способ нанесения покрытий / Л. С. Белевский, В. И. Кадошников, Ю. В. Миронов. 1986.
12. Белевский Л. С. // Изв. вузов. Чер. металлургия. 1987. № 7. С. 104.
13. Белевский Л. С. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом. Магнитогорск: Лицей РАН, 1996.
14. Анцупов В. П. Теория и практика плакирования гибким инструментом. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 1999.
15. Завалищин А. Н., Смирнов О. М., Тулунов С. А. Модификация поверхности металлических изделий с использованием покрытий. М.: Орбита-М, 2012.
16. Платов С. И., Дема Р. Р., Зотов А. В. // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. 2013. № 1. С. 69.
17. Рыбакова Л. М., Куксенова Л. И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982.
18. Пат. 2362664 (РФ). Способ обработки зубчатой поверхности цилиндрических деталей машин / Л. С. Белевский, С. А. Тулунов, О. Н. Тулунов, И. Л. Белевский. 2009.