



УДК 621.7

Л.С. Белевский, Р.Р. Дема,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
университет им. Г.И. Носова
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: demarr_mgtu.ru@mail.ru

М.А. Леванцевич,
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: levancev@mail.ru

Е.В. Пилипчук, Е.Л. Юреть
Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: zhan-09@rambler.ru

Дата поступления 05.06.2019

В авторской редакции

УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ И НАНЕСЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ПРОВОЛОЧНЫМИ ЩЕТКАМИ

Аннотация

Рассмотрен процесс упрочнения металлической поверхности с одновременным нанесением функциональных покрытий гибким инструментом – вращающимися проволочными щетками (ВПЩ). Этот процесс, впоследствии названный фрикционным плакированием (ФП), впервые начал исследоваться в середине 80^х годов прошлого века в Магнитогорском горно-металлургическом институте им. Г.И. Носова. Процесс ФП реализуется на токарных, шлифовальных и других металлорежущих станках с использованием простой оснастки или ручных углошлифовальных машин (УШМ). При металлографическом исследовании поверхностных слоев в качестве исследуемых образцов использовали пластины 3x20x100 мм из стали марки 08. Покрытия наносили на плоскошлифовальном станке, на который вместо абразивного круга устанавливалась ВПЩ 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 проведены методом реплик на электронном микроскопе «TESLA BC-613». Измерения и анализ шероховатости проводились по методике стандарта ГОСТ Р ИСО 25178 на установке Contour GT K1 (Bruker). Средняя толщина покрытия составляет 20-25 мкм, размеры частиц 0,3-0,6 мкм. Проведены исследования микроструктуры и свойств функциональных покрытий, сформированных после обработки поверхности изделий методом ударно-фрикционной обработки гибким инструментом. Установлено, что данная обработка обеспечивает получение твердого наноструктурированного поверхностного слоя, с размером фрагментов до 0,13 мкм подобно тому, как это достигается при интенсивной пластической деформации. Установлено, что использование электрического тока интенсифицирует процесс, при этом существенно увеличивается толщина покрытия и его пластичность. Нанесение медьсодержащего покрытия на штоки и плунжеры гидравлики позволило увеличить срок службы в 1,4-3 раза, на зубья колес волновых передач торцевого исполнения в 6 раз.

Ключевые слова: фрикционное плакирование, ударно-фрикционное плакирование, электрофрикционное плакирование, гибкий инструмент, покрытие, наноструктурирование, износостойкость.

Введение

В Магнитогорском горно-металлургическом институте упрочнением с одновременным нанесением покрытий проволочными щетками до середины 80-х годов прошлого века никто не занимался, как, кстати, и в мире. Впоследствии нам удалось найти два «древних», забытых авторских свидетельства [1, 2] и один патент о нанесении алюминиевого покрытия на стекло [3]. Никаких других публикаций по этой тематике в научно-технической литературе обнаружить не удалось. Идея и последующая разработка такой технологии появились, как нередко бывает, при выполнении совсем другой работы. В 1984 году проводилась научно-исследовательская работа по улучшению служебных свойств биметаллической стальной проволоки (Белевский Л.С. – руководитель, Кадошников В.И., Миронов Ю.В. и др.). Основная проблема заключалась в почти полном отсутствии сцепления между стальным сердечником и алюминиевой оболочкой. Были опробованы различные варианты обработки поверхности стального сердечника перед опрессованием алюминием, в том числе и зачистка вращающимися проволочными щетками (ВПЩ), но сцепление не улучшалось. Появилась идея нанести щеткой перед опрессованием на стальной сердечник подслоя алюминия. Испытания показали, что сцепление значительно улучшилось. Кроме того, было установлено, что такая обработка упрочняет поверхность стальной основы и повышает усталостную прочность. Мы довольно быстро поняли, что такая технология далеко выходит за рамки решения частной задачи и может найти широкое применение в машиностроении и металлургии. Впоследствии была создана лаборатория триботехники (рук. Белевский Л.С.), в которой способ упрочнения с одновременным нанесением покрытий получил дальнейшее теоретическое и экспериментальное развитие в работах Анцупова В.П., Кадошникова В.И., Досманова В.А., Волгина Л.В., Ошеверова И.И., Завалищиной Е.Г., Демы Р.Р. и др.

В этом году исполняется 35 лет с «рождения» и начала работ над этой важной научно-технической проблемой, над которой продолжают работать и многие другие, кроме перечисленных, работники университета. Результаты работ опубликованы в различных изданиях и докладывались на международных конференциях, симпозиумах и конгрессах в России, Франции, США, Японии, Южной Корее и Испании.

Необходимо отметить участие в исследовании и развитии рассматриваемой технологии нанесения покрытий ученых объединенного института машиностроения НАН Беларуси и Белорусского государственного университета (руководитель Леванцевич М.А.), а также ученых Тольяттинского государственного университета (Драчев О.Н., Зотов А.В.).

Следует заметить, что название способа упрочнения поверхности с одновременным нанесением покрытий и его аббревиатура неоднократно менялись: поверхностное пластическое деформирование с одновременным нанесением покрытий (ППДсП); деформационное плакирование гибким инструментом (ДПГИ); плакирование гибким инструментом (ПГИ). Во избежание путаницы в данной работе мы будем употреблять следующие термины: фрикционное плакирование (ФП); ударно-фрикционное плакирование (УФП); электрофрикционное плакирование (ЭФП).

В заключение хотелось бы подчеркнуть, что приоритет в этой области принадлежит ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Авторами первых публикаций [4], авторского свидетельства [5] и кандидатской диссертации [6] являются работники нашего университета. По этой тематике защищено более десяти диссертаций, в том числе три докторских, опубликованы монографии [7-9].

Несмотря на большое количество работ, выполненных за более чем тридцатилетний срок, процесс фрикционного плакирования изучен и, особенно, внедрен в различных областях техники явно недостаточно, что сдерживает его более широкое и

эффективное использование в России и других странах.

В настоящей работе сделана попытка очень краткого анализа основных научных и практических результатов при исследовании различных видов фрикционного плакирования. Надеемся, что нас простят авторы работ, которые не упомянуты в библиографическом списке. Сделать обзор очень большого количества работ в одной небольшой статье невозможно.

Основная часть

Влияние поверхностных слоев на свойства материалов начали изучать еще в XIX веке. Такие поверхностные явления, как трение, смазка и адгезия играют важную роль во многих технологических процессах. Существуют сотни методов модификации поверхности, связанных с ее упрочнением, нанесением покрытий, износостойкостью, усталостной прочностью, коррозией и другими свойствами. Одним из эффективных способов упрочнения является поверхностное пластическое деформирование (ППД). В последние десятилетия получили развитие комбинированные процессы обработки, когда наряду с механическим воздействием добавляется действие электрического тока, лазера, плазмы и т.п. Одним из комбинированных методов является фрикционное нанесение металлических покрытий [10]. Покрытие наносится при прижатии прутка из медьсодержащих сплавов к вращающейся обрабатываемой детали. Процесс требует подготовки поверхности, малопроизводителен, толщина покрытия 1-2 мкм. В результате усилия прижима стержня происходит упрочнение поверхностного слоя детали, что приводит к повышению сопротивления усталости [11]. Значительно эффективнее использовать для упрочнения с одновременным нанесением покрытий гибкий инструмент – вращающиеся проволочные щетки [7-8], которые давно применяются для очистно-упрочняющей обработки в различных областях техники [12]. При фрикционном плакировании (ФП) стержень из материала покрытия (МП) с определенным усилием прижимается к ворсу ВПЩ. В зоне контакта МП разогревается почти до температуры

плавления, налипает на концы ворсинок и переносится на обрабатываемую поверхность изделия. Величина перемещения ВПЩ на поверхность изделия называется натягом (N). За счет совместной пластической деформации частичек МП и поверхностного слоя изделия покрытие имеет прочное сцепление с основой.

Материалы, оборудование, методика (при проведении исследований в МГТУ им. Г.И. Носова)

Исследуемыми образцами служили пластины 3x20x100 мм из стали марки 08. Покрытия на них наносили на плоскошлифовальном станке, на который вместо абразивного круга устанавливалась ВПЩ и приспособление для подачи материала покрытия. Цилиндрические образцы (сталь марки 20 и 50) диаметром 20 мм обрабатывали на токарном станке, на суппорт которого устанавливалась специальная приставка [7] или простейшее приспособление с ручной углошлифовальной машиной (УШМ). Диаметр ВПЩ 220-290 мм, скорость вращения 3000-6000 об/мин, диаметр стальной проволоки ворса – 0,25-0,50 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 (n) 2-9. В качестве материала покрытия были использованы медь и латунь Л-63. Для металлографических исследований использовали оптические микроскопы «Эпиквант» (Carl Zeiss, Германия), «Ерityр-2» (Carl Zeiss, Jena, Германия), IM7000 (Meiji Techno, Япония) и растровый электронный микроскоп РЭМ JSM-6490 LV (Jeol, Япония). Микротвердость определяли на приборах ПМТ-3 (ОАО «ЛМО», г. Санкт-Петербург) и Buehler Micromet (Buehler, Бельгия). *Металлографические исследования выполнены в ЦПК НИИ Наносталей ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» к.т.н. Ефимовой Ю.Ю. Механические испытания проводили на разрывной машине Shimadzu (Япония). Исследование микротопографии поверхности*

проводились в лаборатории Научно-исследовательского центра «Микротопография» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» на оптическом профилометре Contour GT K1 (Bruker, Германия) Губаревым Е.В.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Фрикционное и ударно-фрикционное плакирование. Для изучения механизмов деформирования поверхностного слоя основы и формирования покрытий при нанесении их гибким инструментом проведены модельные эксперименты на моно- и поликристаллических материалах. Было установлено, что толщина и структура деформированного слоя в сильной степени зависят от параметров инструмента и режимов обработки. В качестве примера рассмотрим результаты обработки металлических поверхностей двумя типами ВПЩ – сплошной из гофрированной стальной проволоки диаметром 0,25 мм и секционной из стальной закаленной проволоки диаметром 0,5 мм, сплетенной в пучки. Сплошная ВПЩ при окружной скорости 30-35 м/с оказывает, в основном, фрикци-

онное воздействие на поверхность металла. При постоянных параметрах рабочего инструмента толщина и структура деформированного слоя основы и покрытия существенно зависят от числа проходов инструмента по образцу, величины натяга, скорости обработки, материала основы и других факторов.

На рисунке 1 показана микроструктура поверхностных слоев сталей марок 08Ю, 20 и 55С2 после обработки сплошной ВПЩ с одновременным нанесением алюминиевого покрытия. Наибольшие изменения в структуре и максимальная толщина пластически деформированного поверхностного слоя имеют место в наиболее мягкой стали 08Ю (рисунок 1, а). Минимальная толщина деформированного слоя и изменения структуры при аналогичных параметрах обработки выявлена при металлографическом анализе стали 55С2 (рисунок 1, в). В таблице приведены значения микротвердости поверхности различных материалов после обработки сплошной ВПЩ.

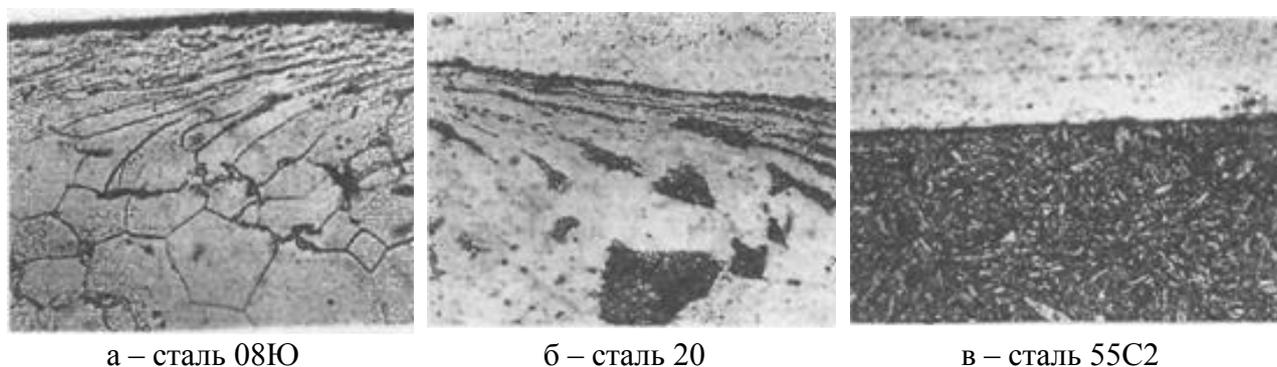


Рисунок 1. Микроструктура поверхностных слоев различных марок стали, после обработки (N = 1 мм, n = 10): а – 08Ю, б – 20, в – 55С2, х 800

Таблица 1

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

Материал	Сталь			Mo	W
	08кп	45	ШХ15 (закал.)		
до обработки	1160	2360	6100	2150	4430
после обработки	1750	3260	6120	2950	5500

Известно, что при применении секционных дисковых щеток поверхность упрочняется наиболее эффективно [12]. Нами для упрочнения и наноструктурирования поверхностного слоя использовались секционные щетки, изготовленные из стальной закаленной проволоки, сплетенной в пучки. При входе в контакт такого пучка с поверхностью изделия он оказывает не только фрикционное воздействие, но и ударное, подобно струе дроби из дробеметной установки или чеканке. Обычно скорость пучка дроби составляет 60-70 м/с. Такие скорости реализованы и в нашем эксперименте. Будем называть этот процесс ударно-фрикционным плакированием.

При исследовании возможности наноструктурирования стальной поверхности гибким инструментом обработка образцов проводилась в два этапа. Вначале поверхность образцов упрочняли секционной ВПЩ, а затем ее заменяли на сплошную, которой наносили покрытие.

Исследование микроструктуры методами оптической микроскопии показало,

что во всех случаях на поверхности образуется деформированный слой (рисунок 2). В образце стали с феррито-перлитной структурой, подвергнутого обработке секционной ВПЩ, на поверхности обнаружен слой, имеющий повышенную травимось, толщиной порядка 50 мкм (рисунок 2, а). В образце, подвергнутого комбинированной обработке (деформационной + нанесение покрытия), на поверхности были выявлены два слоя: первый слой – латунное покрытие толщиной до 10 мкм (позиция 1 рис. 2, б) и второй слой – слой сильнодеформированной структуры толщиной порядка 30 мкм (позиция 2 рис. 2, б).

Растровый электронный микроскоп (РЭМ) показал, что в обоих случаях в микроструктуре поверхностного слоя происходит формирование деформационных полос, состоящих из вытянутых зерен феррита, которые ориентированы перпендикулярно оси образца (рисунок 3, а). Кроме того, происходит вытягивание перлитных участков и деформация и дробление в них цементитных пластин (рисунок 3, б).

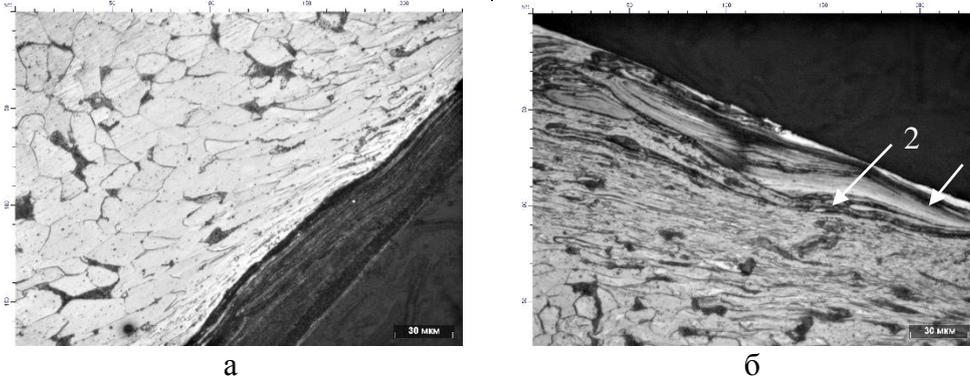


Рисунок 2. Микроструктура поверхностного слоя прутка стали марки 20: а – ударно-деформационная; б – комбинированная обработка щетками, х 500

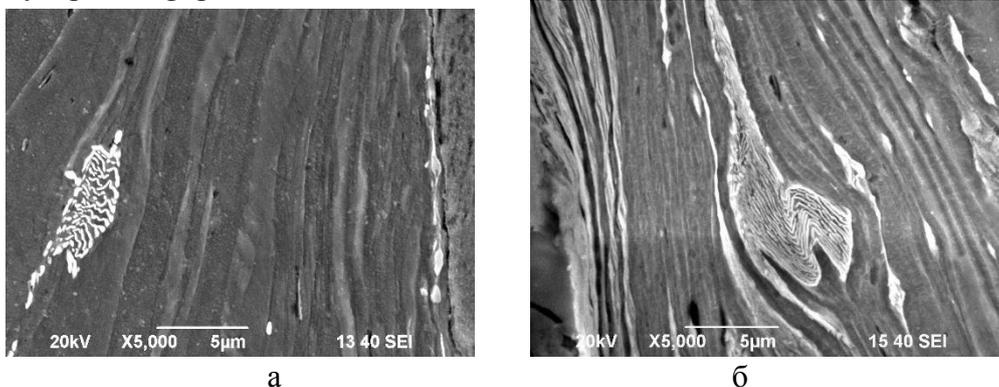


Рисунок 3. Микроструктура поверхностного слоя прутка стали 20: а – ударно-деформационная обработка; б – комбинированная обработка

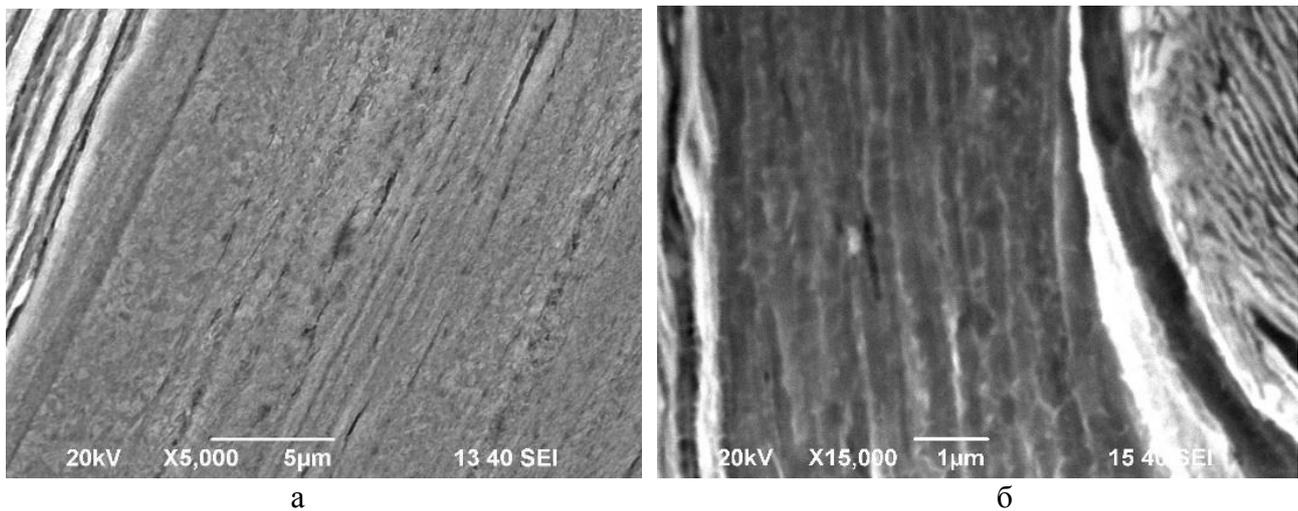


Рисунок 4. Микроструктура поверхностного (а) и приповерхностного (б) слоя прутка стали 20, подвергнутого ударно-деформационной обработке секционной ВПЩ

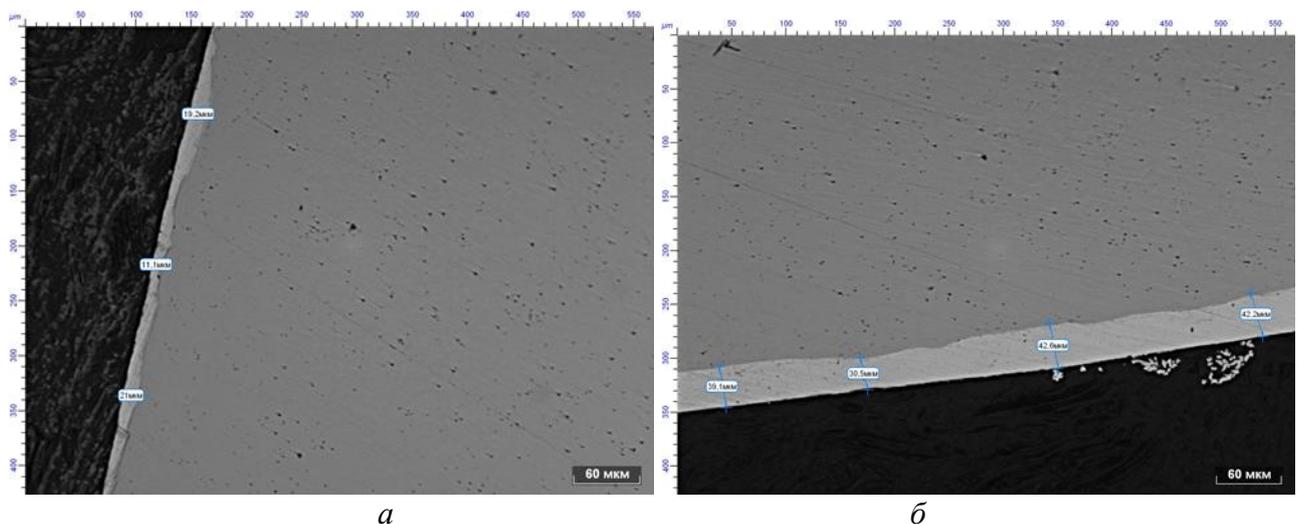


Рисунок 5. Толщина покрытия: а – ФП, б – ЭФП

Слой с повышенной травимостью в образце, подвергнутом ударно-деформационной обработке секционной ВПЩ, методами оптической микроскопии невозможно разрешить (рисунок 2, а). Методом РЭМ лишь в отдельных участках различаются волокна толщиной порядка 0,15 мкм, что свидетельствует о большой деформации (рисунок 4). Такой слой можно условно отнести к аморфизированному слою [13].

В основном материале в приповерхностном слое помимо образования в микроструктуре деформационных полос развиваются процессы фрагментации в них с образованием фрагментов размером до 0,13 мкм (рисунок 4, б). Аналогичный размер фрагментов возможно получить различными методами интенсивной пластической де-

формацией (ИПД), в частности равноканальным угловым прессованием (РКУП) на таком же классе сталей [14, 15].

Исследование электрофрикционного способа плакирования. Способ нанесения металлических покрытий с помощью ВПЩ с использованием электрического тока, предложен А.А. Абиндером в 1940 г. [1]. Какие-либо исследования этого процесса в технической литературе отсутствуют.

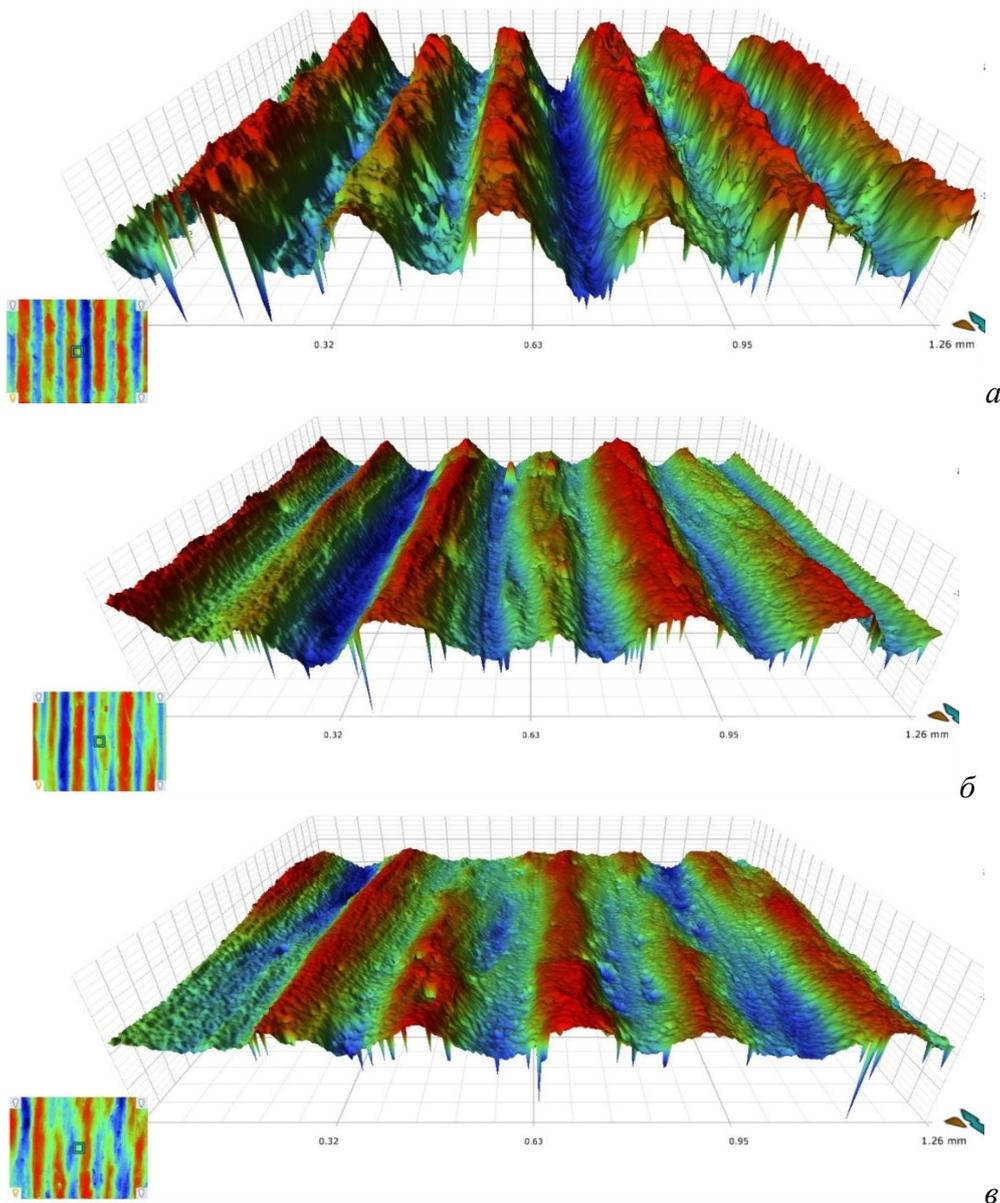


Рисунок 5. Микротопография поверхности образцов. Обработка поверхности: а – точение ($Wz \approx 25$ мкм, $Wsm \approx 90$ мкм), б – фрикционное плакирование ($Wz \approx 15$ мкм, $Wsm \approx 110$ мкм), в – электрофрикционное плакирование ($Wz \approx 8$ мкм, $Wsm \approx 110$ мкм); (Wz и Wsm – усредненные амплитудная и шаговая характеристики профиля волнистости)

Для проведения модельных опытов нами была изготовлена установка, которая позволяла менять напряжение от 10 до 40 В и силу тока от 20 до 120 А. Проведена серия экспериментов по нанесению покрытий на цилиндрические образцы диаметром 18 мм (сталь 20). Нанесение покрытий проводилось на токарном станке, на суппорте которого была закреплена угловая шлифовальная машинка с ВПЩ. Диаметр ВПЩ 100 мм, длина ворса – 25 мм, диаметр проволоки ворса – 0,25 мм. Скорость вращения щетки – 11 000 об/мин. Натяг – 1 мм. Ниже

приведены результаты исследований двух образцов, один из которых обрабатывался без подвода электрического тока, а другой при тех же режимах обработки – с подводом импульсного электрического тока, с напряжением 40 В и силой тока 50 А. Положительный полюс подводился к металлу покрытия (МП), а отрицательный – к обрабатываемому образцу. Таким образом, происходил дополнительный разогрев в зоне контакта МП-ВПЩ и в зоне контакта ВПЩ-поверхность образца. В качестве материала покрытия использовалась латунь

Л63. Результаты металлографического и электронно-микроскопического исследования представлены на рисунке 5. На рисунке б, а показана микротопография поверхности, обработанной точением. При ЭФП (рисунки б, в) поверхностные слои изделия выглядят более «сглаженными», чем при ФП (рисунок б, б). Очевидно, что дополнительный разогрев при подводе электрического слоя делает поверхностный слой более пластичным.

Бороздки, которые оставляет ворсинки щетки, успевают деформироваться, об этом свидетельствуют также и замеры микротвердости. Микротвердость покрытия при ЭФП и нагрузке 10 гс составляет в среднем 2432 МПа, а при ФП и той же нагрузке 4290 МПа. Деформация основы при ЭФП и ФП происходит примерно одинаково. Толщина покрытия при ЭФП примерно в 2 раза больше, чем при ФП (рисунок 5).

В работе [16] исследована структура хромовых покрытий, сформированных ЭФП на специальной установке, в которой использовали металлическую щетку с никромовыми пластинами-вставками. Положительные полюс подводили к ролику из металла покрытия, а отрицательный – к вставным никромовым пластинам. Толщина слоя хромовых покрытий составляла 12...15 мкм. Толщина двухслойных покрытий хром-фторопласт Ф-4 и хром-баббит Б83 составляла 18...20 мкм. Проведены металлографические и трибологические исследования покрытий. Установлено, что верхний слой хромового покрытия состоит из мелких и крупных частиц подплавленного хрома. Триботехнические испытания показали, что дополнительные покрытия из фторопласта или баббита не дает каких-либо существенных преимуществ, в том числе и по сравнению с образцами с гальваническими хромовыми покрытиями. Параметр шероховатости Ra у покрытий нанесенных ЭФП на 30 % выше, чем у гальванических хромовых покрытий.

В работах [17, 18] произведена оценка влияния функциональных покрытий на снижение генерируемого зубчатым зацеплением шума. Установлено, что эффектив-

ность применения технологии ФП для снижения шума конических зубчатых передач во многом зависит от рационального выбора состава материала покрытия. Покрытия на рабочем профиле зубьев колес в ряде случаев значительно меняют общий характер распределения звуковой энергии по частотам, снижая уровень шума на одних частотах и оставляя его неизменным или даже повышая на других. При этом лучшие результаты по снижению уровня шума зубчатых передач во всем спектре частот обеспечило покрытие из бронзографита Бр05С20Гр0. В итоге, снижение шума передачи по общему уровню составило от 2 до 4 дБ, а по отдельным спектральным составляющим от 6 до 9 дБ.

Нанесение антифрикционных покрытий на детали машин для повышения износостойкости. Области применения обработки деталей методом ФП. В качестве примера рассмотрим обработку группы деталей металлургического оборудования [7, 8].

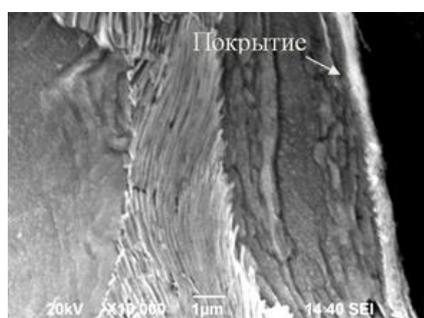
Штоки гидроцилиндров длиной 3190-5165 мм и диаметром 60-90 мм механизма перемещения стола наждачно-зачистных станков прокатного цеха. Штоки изготавливаются из стали марки 45 с последующей закалкой ТВЧ до твердости 50-55 НРС. Шток работает в паре с бронзовыми втулками и резиновыми уплотнителями в режиме граничного трения в условиях сильной запыленности. Во время работы окалина вместе с абразивной пылью налипает на маслянистый шток, вызывая его интенсивный износ. Испытания показали увеличение стойкости в 1,4-3,0 раза, за счет нанесения методом ФП медного покрытия.

Плунжеры механизма гидравлического уравнивания 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. Наблюдения показали, что, несмотря на истирание покрытия в процессе работы, интенсивного износа плунжеров не наблюдается, на рабо-

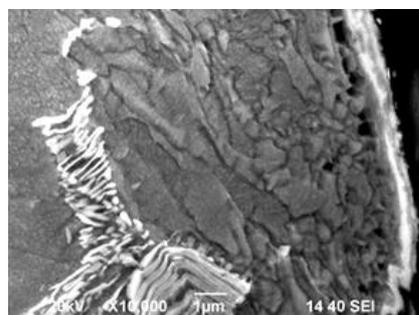
чей поверхности нет задиров, рисок, царапин. Результаты испытаний показали увеличение стойкости в 1,4-1,7 раза.

Зубчатые венцы волновых передач и роторы электрических машин [7, 19, 20]. Покрытия наносились на зубчатые венцы цилиндрических колес и волновых передач электрических машин малой мощности (ЭМММ) на специально разработанной установке. Модуль зацепления 0,15-0,5 мм. Диаметры торцевых колес 40-200 мм. Диаметры цилиндрических колес 25-100 мм. Материал колес – сталь марок 14X14H2, X16H6, 20X13. Условия эксплуатации: Рабочие температуры от -60 до +200°C.

На рисунке 7 показана микроструктура поверхности зуба цилиндрического колеса. Толщина медьсодержащего покрытия около 1 мкм (рисунок 7, а). Под покрытием наблюдается деформированный слой, в котором происходит фрагментация феррита на более мелкие зерна и разрушение цементных пластин (рисунок 7, б).



а



б

Рисунок 7. Микроструктура поверхности зуба колеса

Заключение

Рассмотрен процесс упрочнения металлической поверхности с одновременным нанесением функциональных покрытий гибким инструментом – вращающимися проволочными щетками (фрикционное плакирование – ФП). Приоритет в теоретическом и экспериментальном исследовании этого процесса, а также разработка технологий для его практического применения принадлежит МГТУ им Г.И. Носова.

При обработке гибким инструментом всех исследуемых материалов наблюдается упрочнение поверхностного слоя

толщиной 0,04-0,14 мм. Впервые установлено, что при обработке ВПЩ на поверхности образуется тонкий слой аморфизированного материала, причем наиболее четко это проявляется в материалах с высокой температурой плавления, особенно у вольфрама. Впервые установлено, что методом ударно-фрикционной обработки гибким инструментом возможно получение твердого, наноструктурированного поверхностного слоя, с размером фрагментов до 0,13 мкм подобно тому, как это достигается при ИПД. Ударно-фрикционная обработка секционными ВПЩ может быть использована для упрочнения деталей и инструмента.

Нанесение функциональных покрытий может дополнительно повысить износостойкость и другие служебные характеристики изделий.

Установлено, что использование электрического тока интенсифицирует процесс ФП, при этом существенно увеличивается толщина покрытия и его пластичность. Нанесение медьсодержащего покрытия на штоки и плунжеры гидравлики позволило увеличить срок службы в 1,4-3 раза, на зубья колес волновых передач торцевого исполнения в 6 раз.

Процесс ФП экологически чист, производителен, реализуется на токарных, шлифовальных и других металлорежущих станках с использованием простой оснастки или ручных углошлифовальных машин.

Библиографический список

1. А.с. 57162 (СССР). Способ нанесения металлических покрытий // А.А. Абиндер // Б.И. 1940. №6. С 1-3.
2. А.с. 139892 (СССР). Автомат для серебрения циферблатов часов методом натирания / И.М. Смирнов, Н.А. Николаев, С.Д. Крылов // Б.И. 1961. №14. С. 59.
3. Пат. 863087 (Великобритания). Улучшение метода нанесения металлического покрытия на поверхность / А.Д. Джеймс // Реферативный журнал. Металлургия. 1961. №3. С. 128.
4. Белевский Л.С. Поверхностное пластическое деформирование с одновременным нанесением покрытий // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1987. - №7. - С. 104-105.
5. А.с. 1206068 СССР, В 24 В 39 / 00. Способ нанесения покрытий / Л.С. Белевский, В.И. Кадошников, Ю.В. Миронов. Опубл. 23.01.86. Бюл. №3. 3 с.
6. Кадошников В.И. Совершенствование технологии производства биметаллической сталеалюминиевой проволоки применением нового способа нанесения промежуточного слоя. Дис. канд. техн. наук. Магнитогорск, 1988. 192 с.
7. Белевский Л.С. Пластическое деформирование поверхностного слоя и формирование покрытия при нанесении гибким инструментом. – Магнитогорск: Лицей РАН, 1996. 231 с.
8. Анцупов В.П. Теория и практика плакирования гибким инструментом. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. 241 с.
9. Завалищин А.Н., Смирнов О.М., Тулупов С.А. Модификация поверхности металлических изделий с использованием покрытий. М.: Орбита-М, 2012. 335 с.
10. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. 128 с.
11. Польцер Г., Майснер Ф. Основы трения и изнашивания: пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
12. Перепичка Е.В. Очистно-упрочняющая обработка изделий щетками. М.: Машиностроение, 1989.
13. Белевский Л.С., Белевская И.В., Ефимова Ю.Ю. Фрикционная наноструктурирующая обработка металлических поверхностей и нанесение функциональных покрытий гибким инструментом // Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2014. № 1. С. 70-76.
14. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet PRO software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing. // Metal Science and Heat Treatment. 2012. Т. 54. № 7-8. С. 387-392.
15. Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Барышников М.П., Никитенко О.А. Формирование структуры и механических свойств углеродистой конструкционной стали в процессе наноструктурирования методом равноканального углового прессования // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 7. С. 11-17.
16. Белевский Л.С., Леванцевич М.А., Юреть Е.Л., Пилипчук Е.В., Дема Р.Р. Повышение эксплуатационных характеристик деталей и оборудования методом электрофрикционного плакирования гибким инструментом // Производство проката. 2018. № 10. С. 32-38.

17. Басинюк В.Л., Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Мардосевич Е.И. Улучшение триботехнических свойств и снижение шума зубчатых передач плакированием функциональных покрытий на рабочий профиль сопрягаемых зубьев // Трение и износ. 2013. Т. 34. № 6. С. 575-582.
18. Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н. Улучшение эксплуатационных характеристик деталей поверхностным модифицированием методом плакирования гибким инструментом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 10 (130). С. 16-20.
19. Belevskiy L., Popov V., Tulupov S., Smirnov O. Enhancement of reliability of machines and materials by friction plating // Advanced Materials Research. 2009. Т. 59. С. 46-50.
20. 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 2. Исследование влияния функциональных покрытий, нанесенных гибким инструментом, на некоторые свойства материалов и области их применения // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 1. С. 36-43.
21. Анцупов В.П., Завалищин А.Н., Кадошников В.И., Дема Р.Р. Повышение стойкости режущего инструмента нанесением композиционных антифрикционных покрытий // Технология машиностроения. 2003. № 4. С. 25-26.

Information about the paper in English

L.S. Belevskiy, R.R. Dema

Nosov Magnitogorsk State Technical University
Magnitogorsk, Russia
E-mail: demarr_mgtu.ru@mail.ru

M.A. Levantsevich

Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: levancev@mail.ru

E.V. Pilipchyuk, E.L. Yurut

Belorussian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus
Received 05.06.2019

SURFACE HARDENING AND FUNCTIONAL COATINGS INSTALLED BY ROTATING WIRE BRUSHES

Abstract

This paper examines the process of steel surface hardening combined with the deposition of functional coatings using flexible tools – i.e. rotating wire brushes. The first study that looked at this process, which was later named Friction Cladding, was undertaken in the middle of the 1980s at the Nosov Magnitogorsk Mining and Metallurgy Institute. Friction cladding can be implemented on lathes, grinders and other metal-cutting machines with simple tools or angle grinders. 3x20x100 mm plates of steel 08 were used as specimens in a metallographic study of surface layers. The coatings were installed on a flat surface grinder equipped with a rotating wire brush (instead of an abrasive disc) and a coating material feeder. Ø20mm cylindrical specimens of steel 50 were machined on a lathe with an angle grinder fixed to the lathe carriage. Optical microscopes and the scanning electron microscope JSM-6490 LV were used for metallographic study. Electron microscopical study was conducted with the help of the electron microscope TESLA BC-613 using a replica technique. Roughness measurements and analysis were conducted per GOST R ISO 25178 on the Contour GT K1 (Bruker) unit. The average coating thickness is 20-25 µm, the particle size varies from 0.3 to 0.6 µm. The study looked at the microstructure and properties of the functional coatings produced after the surface had gone through impact friction cladding with a flexible tool. It was established that such processing created a hard nanostructured surface layer with the fragment size reaching 0.13 µm, similar to the effect produced by severe plastic deformation. It was found that the use of electric current intensified the process and resulted in a much thicker and ductile coating. Application of copper-containing coatings to hydraulic rods and rams resulted in a 1.4-3 times longer life and extended the life of wave gear teeth by 6 times.

Keywords: friction cladding, impact friction cladding, friction electrocladding, flexible tools, coating, nanostructuring, wear resistance.