УДК 621.03:620.179.16

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ТЯЖЕЛО НАГРУЖЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Лидия Ивановна Куксенова, Дмитрий Александрович Козлов

ИМАШ им. А.А. Благодирова РАН, Москва, Россия

lkukc@mail.ru

Аннотация. Описана методика электроискрового легирования и режимы нанесения медных покрытий на поверхности изделий из легированных сталей. Выявленные характеристики трения и износа стальной поверхности с антифрикционными покрытиями показали, что бронзы марок БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6 могут быть рекомендованы в качестве материала покрытий на стали 30ХГСН2А для тяжело нагруженных узлов трения. Разработанные режимы процесса нанесения покрытий показали их триботехническую эффективность.

Ключевые слова: электроискровое легирование, тяжело нагруженные узлы трения, покрытия, сталь, бронза.

INVESTIGATION OF THE OPERATING PROPERTIES OF COATINGS FOR HEAVILY LOADED STEEL PARTS OF SLIP FRICTION

L.I. Kuksenova, D.A. Kozlov

IMASH RAN, Moscow, Russia

lkukc@mail.ru

Abstract. The method of electrospark alloying modes of deposition of copper coatings on the surfaces of products from alloyed steels are described. The characteristics of friction and wear of the steel surface with antifriction coatings have shown that bronzes of the BrAZhMts10-3-1,5 and BrMtsF3-6 grades can be recommended as a coating material of 30HGSN2A steel for heavy loaded friction units. The identified modes of the coating process provided with their tribological efficiency.

Keywords: electrospark alloying, heavy loaded friction units, coatings, steel, copper.

Введение. Методы повышения эксплуатационных свойств узлов трения в соответствии с делением внешних факторов на технологические, конструктивные и эксплуатационные, как правило разрабатываются в этих трех направлениях. В настоящее время насчитывается более ста разных технологических методов обработки поверхностей деталей машин и приборов. Они делятся на группы: пластическая деформация поверхностного слоя, термическая, химико-термическая и термомеханическая обработки, нанесение покрытий, электрические и химические обработки, комбинированные методы. Особое место отводится различным методам поверхностного легирования, к которым относится метод электроискровой обработки. Он позволяет получать высокую прочность сцепления легированного слоя и

материала основы, возможности нанесения на упрочняемую поверхность любых токопроводящих материалов, в том числе тугоплавких металлов и соединений. Преимуществами данного метода являются низкая энергоёмкость процесса и относительная простота выполнения технологической операции [1].

Примером эффективного применения метода электроискрового легирования является кузнечно-штамповое производство с целью защиты рабочих поверхностей и увеличения их ресурса. Используемые электроды из твердых сплавов ТК, ВК, СТИМ приводят к повышению ресурса работы штампов на 30-50% [2,3].

В инструментальном производстве метод ЭИЛ применяется для увеличения ресурса работы твердосплавного инструмента. В [4] показано, что при модификации поверхности свёрл из стали Р6М5 с помощью нанесения покрытия из твердого сплава Т5К6 ресурс инструмента увеличивается в 1,5-1,7 раза. В [5] разработан способ восстановления эксплуатационных свойств твердосплавных пластин из сплавов ВК при помощи предварительной цементации при температуре 930⁰С и последующего электроискрового легирования сплавом ВТ1-0. В [6] покрытия СТИМ-2 и СТИМ-3 наносились на зенкера из стали Р6М5, сверла и метчики из стали 11М5Ф, в результате чего был значительно снижен коэффициент трения при обработке деталей инструментом; при этом стойкость зенкера увеличилась в 1,4 раза, а стойкость свёрел возросла до 4 раз по сравнению с исходным инструментом. Метод электроискрового легирования применяется и в сфере ремонта автотранспорта для восстановления поверхности деталей машин. Покрытие из бронзы БрКМц3-1 наносилось на внутреннюю поверхность гильзы цилиндра из чугуна СЧ28-48, в результате чего без снятия двигателя удалось его восстановить [7].

Опыт применения электроискрового легирования для модификации поверхностных слоев изделий свидетельствует о его высокой трибологической эффективности особенно для тяжелых условий эксплуатации. Во многих конструкциях машин и механизмов ответственного назначения применяют тяжело нагруженные пары трения скольжения, например, шарнирные соединения. Условия работы шарнирных соединений таковы, что при ограниченных размерах они должны выдерживать значительные сосредоточенные нагрузки, обеспечивать минимальные люфты между его элементами, обладать малым коэффициентом трения в условиях высоких контактных давлений и хорошей износостойкостью в течение всего ресурса работы изделия. При этом во многих конструкциях узлов и агрегатов, исходя из требований надежности, при выборе материала для шарнирных соединений большое внимание уделяют вопросам прочности деталей иногда в ущерб их износостойкости [8].

Для повышения износостойкости тяжело нагруженных шарнирных соединений, как правило, используют либо износостойкие покрытия, либо применяют специальные смазочные материалы, формирующие в зоне контакта антифрикционные вторичные структуры [9].

Целью данной работы является повышение антифрикционности и износостойкости поверхностных слоев стальных пар трения с помощью покрытий на основе меди, полученных методом электроискрового легирования (ЭИЛ).

Материалы, методики и результаты исследования. Работа состоит из двух частей: 1 – разработка методики и режимов нанесения покрытий и 2 – оценка триботехнической эффективности покрытий.

В качестве объекта исследования была выбрана сталь 30ХГСН2А, широко используемая для изготовления тяжело нагруженных шарнирных соединений. Образцы из стали подвергали термической обработке, включающей закалку, нагрев до 900-910⁰С, охлаждение в масле и отпуск при температуре 210-215⁰С в течение 2-2,5 часов.

Для нанесения антифрикционного покрытия на цилиндрические образцы использовали бронзы марок БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6. Покрытие наносили на внешнюю поверхность образцов компактными электродами, изготавливаемыми по ТУ 1-92-76-82. Химический состав бронз представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав бронз БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6

Марка бронзы	Химический состав, массовая доля, %													
	Основные компоненты					Примеси, не более								
	Cu	Al	Fe	Mn	P	Sn	Si	Pb	Zn	Ni	Sb	Cr	S	Сумма примесей
БрАЖМц10-3-1,5	ос н.	9-11	2-4	1-2	-	0,1	0,1	0,03	0,5	-	-	-	-	0,75
БрМцФ3-6	ос н.	-	-	2,5-3,5	5,5-6,5	-	-	0,03	0,5	0,5	0,01	0,05	0,01	1,1

Электроискровое легирование осуществляли на модернизированной установке ЭЛФА-512М, которая предназначена для нанесения покрытий на поверхности деталей тел вращения. В состав установки ЕЛФА-512М входит генератор электроискровых импульсов и устройство, осуществляющее вращение детали, а также продольное перемещение электрода вибрационной головки относительно оси вращения, рис.1.

Рис.1. Схема нанесения покрытия при ЭИЛ бронзой стальных образцов

При разработке и обосновании режимов технологии электроискрового легирования решали две основные технологические задачи.

1. Сохранение количественного соотношения легирующих элементов в материале электрода. Нанесение бронзового покрытия электроискровым методом производилось при варьировании величины рабочего тока импульса в пределах 0,7...1,3 А и величины продольной подачи (продольное перемещение детали на один оборот) в пределах 0,5...1,8 мм/об. Остальные постоянные параметры процесса приведены в табл. 2.

Электроискровое легирование электродами из бронз БрМцФ3-6 и БрАЖМц10-3-1,5 стали 30ХГСН2А осуществлялось на воздухе. При нанесении покрытия электродом из бронзы БрАЖМц10-3-1,5 покрытие имело светло-золотистый цвет, а при использовании электрода из бронзы БрМцФ3-6 покрытие формируется с темно-серым оттенком. Спектральный локальный анализ содержания основных легирующих элементов в полученных покрытиях

показал, табл.3, что при электроискровом легировании бронзой БрАЖМц10-3-1,5 на воздухе соотношение легирующих не изменяется; в то время как для покрытия бронзой БрМцФ3-6 наблюдаются значительные потери фосфора (с 5,89 % в электроде до 1,35 % в покрытии).

Таблица 2

Параметры режима нанесения бронзового покрытия электроискровым методом

Число рабочих импульсов тока <i>имп/мин</i>	Ёмкость конденсаторов, <i>мкФ</i>	Скорость вращения детали, <i>об/мин</i>	Число слоев покрытия, <i>шт</i>
530	10	1,2	4

Таблица 3

Содержание легирующих элементов в материале электродов и покрытий при ЭИЛ на воздухе

Образец		Химический состав, масс %						
		Al	Fe	Mn	P	Pb	Zn	Ni
БрАЖМц 10-3-1,5	электрод	10,2	3,4	1,6	—	0,03	0,5	—
	покрытие	10,1	3,3	1,55	—	0,01	0,45	—
БрМцФ3-6	электрод	—	—	2,7	5,89	0,03	0,5	0,5
	покрытие	—	—	2,40	1,35	0,02	0,1	0,25

Известно, что наличие фосфора в бронзе существенно улучшает её трибологические характеристики. Поэтому не допускается снижение нижнего предела содержания фосфора в покрытии. Так как электроискровое легирование представляет собой процесс микросварки, то по аналогии с процессами дуговой сварки неплавящимся электродом процесс ЭИЛ бронзы БрМцФ3-6 проводили в атмосфере инертного газа – аргона. Результаты локального спектрального анализа полученного покрытия представлены в табл.4 [10].

Таблица 4

Содержание легирующих элементов в бронзе марки БрМцФ3-6 и покрытий при ЭИЛ в среде аргона

Образец		Химический состав, масс %				
		Mn	P	Pb	Zn	Ni
БрМцФ3-6	электрод	2,76	5,98	0,035	0,57	0,58
	покрытие	2,59	5,73	0,031	0,50	0,49

Из полученных данных видно, что применение газовой защиты аргоном в процессе электроискрового легирования стали 30ХГСН2А позволяет сохранить количественное соотношение легирующих элементов в покрытии из бронзы БрМцФ3-6.

2. Эффект обратного массопереноса при электроискровом легировании.

Как показал анализ микроструктуры покрытия из бронза БрМцФ3-6, полученного в среде аргона, изменение среды, в которой производится напыление, сказывается на особенностях и

условиях обратного массопереноса в покрытие материала обрабатываемого изделия (стали). Так, в структуре слоя бронзы было отмечено появление частиц стали 30ХГСН2А, рис.2.

Рис. 2. Частицы стали в слое бронзового покрытия (х 300)

Известно, что введение аргона в зону электроискрового легирования и вытеснение воздуха сопровождается увеличением проводимости промежутка электрод – деталь из-за более высокой ионизационной способности аргона. Это в свою очередь, может привести к увеличению количества рабочих импульсов тока (импульсов с амплитудой больше определенного порогового значения для данного режима). Возрастание числа рабочих импульсов в искровом разряде способно вызвать оплавление и отрыв частиц стали от подложки. Кроме того, на развитие процесса искрового разряда при легировании и, соответственно на обратный массоперенос, оказывает влияние такая характеристика используемой газовой межэлектродной среды как величина пробивного напряжения. Величина пробивного напряжения воздуха составляет 32кВ, а аргона 8кВ. С понижением пробивного напряжения в межэлектродном пространстве происходит более полная разрядка емкостей конденсаторов в установках ЭИЛ, приводя к повышению энергии каждого элементарного электрического импульса в аргоне на 75% по сравнению с воздухом [11]. Повышение энергии единичного искрового разряда меняет характер электрического и магнитного полей во время электрического разряда. В работе [12] показано, что при изменении величины электромагнитного поля при ЭИЛ можно менять характер массопереноса в наносимом покрытии, а подбором режимов – исключать явление обратного массопереноса.

Для изучения влияния аргона на качество формирующихся покрытий и возможности устранения обратного массопереноса прибор МИКС-2 (предназначенный для исследования быстропотекающих процессов при точечной контактной сварке) использовали для оценки изменения амплитудного спектра импульсов в искровом разряде между электродом (бронза) и подложкой (сталь).

В процессе экспериментов применяли электрод из бронзы БрМцФ3-6 диаметром 3 мм. Покрытие наносили на втулку диаметром 18 мм из стали 30ХГСН2А по специальному режиму, отличающемуся от основного режима, табл.2, по числу оборотов детали, величине продольной подачи и числу слоев наносимого покрытия: емкость конденсатора 10 мкФ; число оборотов детали 3,6 1/мин; скорость подачи детали 2,9 мм/мин; число слоев покрытия

5; общая толщина покрытия 40-45 мкм; диапазон изменения силы тока в искровом разряде 0-2 кА.

Измерение количества рабочих импульсов тока проводили при осуществлении процесса в воздушной атмосфере и при подаче в электроискровой промежуток аргона с расходом 1,8...2 л/мин.

На рис. 3 представлен спектр распределения импульсов в электроискровом промежутке при реализации процесса на воздухе и в аргоне.

Рис. 3. Влияние газовой среды в искровом промежутке на распределение импульсов тока по амплитуде:

1 – на воздухе; 2 – в аргоне;

Видно, что при введении аргона в искровой промежуток помимо возрастания величины тока разряда свыше 1,5 кА происходит увеличение общего количества импульсов разряда по сравнению с вариантом осуществления процесса на воздухе. При величинах тока разряда в импульсе свыше 1,75 кА происходит некоторое уменьшение количества импульсов разряда как на воздухе, так и в среде аргона. Есть основание полагать, что столь высокое число импульсов тока разряда с одновременно возросшей силой тока вызывает эффект обратного массопереноса частиц стали из подложки в покрытие. Следовательно, подбор оптимального количества импульсов в разряде позволит получить качественное покрытие.

Кроме того, величину силы тока в электрическом разряде можно менять с помощью изменения тока заряда конденсаторов. На рис. 4 представлена зависимость количества рабочих импульсов тока от тока заряда конденсаторов.

Эксперименты показали, рис.4, что при токе заряда конденсаторов в аргоне до 0,9А можно получать 525...530 рабочих импульсов, которое обеспечивается при ЭИЛ на воздухе при токе заряда конденсаторов 1,2 А. Следовательно, выбор оптимального соотношения тока импульсов и тока заряда конденсатора позволяет также изменять режимы обработки для стали с используемыми медными покрытиями, обеспечивая качественный антифрикционный слой.

Исследование микроструктуры покрытия, полученного ЭИЛ в аргоне при пониженном токе заряда конденсаторов, выявило отсутствие в слое покрытия частиц стали, рис. 5,а, на что указывает кривая распределения концентрации железа в слое покрытия, рис.5,б.

На основе проведенных экспериментов, а также качественного анализа характеристик слоя бронзового покрытия, формирующегося на образце, для дальнейших исследований был выбран следующий режим ЭИЛ: величина импульса тока, 1,0–1,1 А; скорость вращения, об/мин – 1,2; продольная подача, мм/об – 1,0–1,1; число проходов 4-5. При этом легирование бронзой марки БрМцФ3-6 производить в аргоне, уменьшая величину тока заряда

конденсаторов до 0,8А. Принятый режим обработки обеспечивает формирование сплошного и равномерного по толщине слоя покрытия. Важными параметрами являются величина тока импульса и величина продольной подачи, которые следует корректировать.

Рис. 4. Зависимость числа рабочих импульсов от тока заряда конденсаторов при электроискровом легировании на воздухе (1) и в аргоне (2)

Рис. 5. Микроструктура поверхностного слоя (а, х500) и распределение содержания железа (б) при нанесении покрытия из бронзы БрМцФ3-6 на подложку из стали 30ХГСН2А в аргоне

С целью выявления возможностей оценки эффективности покрытий и расширения номенклатуры узлов трения, для которых возможно применение ЭИЛ, триботехнические испытания проводили по двум схемам.

1) Испытания на установке УМТ-1 по схеме палец-втулка при ступенчатом повышении нагрузки в условиях сухого трения для оценки коэффициента трения. Контртелом служил палец, изготовленный из стали 30ХГСН2А. Перед каждым испытанием образцы прирабатывали при скорости 0,2 м/с и давлении 5 МПа до получения заданной микрогеометрии поверхности трения и равных для исследуемых пар площадей контакта. В каждом эксперименте с помощью компьютера осуществлялась запись момента силы трения, который служил экспериментальной основой для расчета коэффициента трения. Далее контактное давление дискретно увеличивали через каждый час работы на 25 МПа до предельной величины 350 МПа. После испытаний с помощью металлографического микроскопа изучали качественное состояние поверхности стали 30ХГСН2А с нанесенным на нее антифрикционным покрытием в зависимости от прилагаемой нагрузки.

2) Испытания с целью оценки износостойкости проводили по схеме двух перекрещивающихся цилиндров на универсальной машине КЕ-4. Эталонные валы диаметром 100 мм испытывали в паре с цилиндрическими образцами диаметром 11,3 мм. Валы и образцы изготовлены из стали 30ХГСН2А. Микротвердость образцов и валов составляла 6500...6800 МПа. Вал вращался с постоянной окружной скоростью 0,06 м/с. Образец после приработки в процессе испытаний прижимался к валу с постоянной нагрузкой 250 МПа.

Исследование макрошлифов после нанесения покрытий, рис.6, показало, что величина тока импульса оказывает существенное влияние на формирование покрытия. При значении тока импульса в пределах 0,7–0,8А формируется слой бронзы с толщиной до 6 мкм. Повышение тока в импульсе до 1,0–1,1А сопровождается формированием слоя бронзы толщиной 8–10 мкм. При токе импульса более 1,2А наблюдаются увеличение толщины покрытия до 16–18 мкм.

Таким образом, качественный металлографический анализ позволяет сформулировать два основных положения: с увеличением тока импульса, рис.6,а, увеличивается толщина покрытия, возрастает ее неравномерность по поверхности обрабатываемого образца и, следовательно, ухудшаются характеристики микрогеометрии поверхности. Увеличение продольной подачи детали, рис.6,б, в процессе электроискрового легирования сопровождается, наоборот, снижением толщины слоя покрытия. Так, при продольной подаче 0,5–0,9 мм/об толщина слоя покрытия составляет 10–12 мкм, а при подаче 1,1–1,4 мм/об толщина слоя бронзы уменьшается до 6–7 мкм. Использование продольной подачи более 1,5–1,6 мм/об сопровождается нарушением сплошности слоя покрытия и образованием участков, не покрытых бронзой.

Следует заметить, что как показали металлографические исследования, после ЭИЛ бронзой на поверхности образцов, появляются неравномерности в виде углубления и выступов с отклонением от среднего положения на величину ± 10 мкм. Поэтому с целью получения равномерной толщины покрытия после электроискрового легирования была применена обкатка поверхности образца роликами. Установлено, что эта дополнительная обработка приводит к некоторому утонению слоя бронзы и значительному улучшению микрогеометрических характеристик поверхности.

По итогам корректировки режима нанесения покрытия были подготовлены образцы для оценки работоспособности покрытий из бронз.

Известно, что одним из наиболее важных эксплуатационных характеристик изделий машиностроения являются триботехнические показатели. На рис.7 представлены результаты оценки коэффициента трения. Из экспериментальных видно, что всем диапазоне внешних давлений коэффициент трения пары с покрытием БрФЖМц10-3-1,5 выше, чем с покрытием БрМцФ3-6. При этом обе кривые имеют минимум коэффициента трения в функции внешнего давления. Для образцов с покрытием БрМцФ3-6 минимальные значения коэффициента трения ($\sim 0,10$) наблюдаются при давлении 150-200 МПа; для образцов с покрытием из БрФЖМц10-3-1,5 наименьшие значения коэффициента трения ($\sim 0,13$) наблюдаются при давлении 200-250 МПа. Следовательно, на основании данных зависимости коэффициента трения от давления на стальную пару трения с бронзовым покрытием можно говорить о большей несущей способности покрытия из высокопрочной бронзы БрФЖМц10-3-1,5 в условиях сухого трения.

Рис. 6. Изменение толщины покрытия бронзы БрМцФ3-6 на стали 30ХГСН2А, х500.

a – в зависимости от величины тока импульса:

1 – 0,7-0,8 А; 2 – 1,0-1,1 А; 3 – 1,2-1,3 А (продольная подача 1,1 мм/об).

б – в зависимости от величины продольной подачи:

1 – 0,5-0,9 мм/об; 2 – 1,1-1,43 мм/об; 3 – 1,5-1,6 мм/об, (импульс тока 1,05А)

Рис. 7. Зависимость коэффициента трения пары сталь-сталь с покрытием из бронз от величины внешнего давления

1 – покрытие БрАЖМц10-3-1,5; 2 – покрытие БрМцФ3-6

Качественный анализ поверхностей трения и результаты оценки их износа, рис.8, показали, что на поверхности трения испытываемых образцов пары сталь 30ХГСН2А – сталь 30ХГСН2А образуются глубокие вырывы металла, происходит интенсивная пластическая деформация и развивается процесс схватывания с характерным разрушением поверхности трения, аналогичным разрушению в реальных узлах. При этом вал и образцы, согласно известным законам трибологии [13], интенсивно изнашиваются (происходит интенсивное, пропорционально времени увеличение износа поверхностных слоев металла, режим установившегося трения не достигается, рис.8, кривая 1). На пути трения 54-72 м глубина пластически деформированного и поврежденного слоя достигает более 120–150 мкм. Покрытие из бронзы БрМцФ3-6 практически в 3 раза снижает уровень поверхностного разрушения стали.

Рис. 8. Изменение толщины изношенного слоя на пути трения:
1 – сталь 30ХГСН2А; 2 – сталь 30ХГСН2А с покрытием БрМцФ3-6

На рис. 9 приведены кривая, иллюстрирующая существенное повышение износостойкости стали 30ХГСН2А при высоком давлении на контакте за счет бронзового тонкопленочного покрытия.

Рис.9. Изменение относительной износостойкости стали с покрытием с увеличением пути трения при давлении 250 МПа

Приведенные на рис.7,8,9 экспериментальные результаты свидетельствуют о весьма высокой работоспособности бронз БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6, когда они находятся в состоянии тонкопленочного покрытия на стали 30ХГСН2А, полученного методом электроискрового легирования. При достаточно высоких давлениях (до 350 МПа) в условиях сухого трения эти бронзы проявляют высокий уровень антифрикционности; при этом относительная износостойкость стали с покрытием при давлении 250 МПа существенно возрастает (до $\approx 2,4$ раз), а заданный ресурс работы в исследуемом эксперименте на пути трения 72 м далеко не исчерпан.

Таким образом, на основе данных экспериментальной оценки характеристик трения и износа покрытий, полученных методом электроискрового легирования, в паре сталь-сталь с покрытием (фактически испытываемая пара представляет собой аналогию с парой сталь-бронза) можно говорить о перспективности применения антифрикционных медных сплавов в качестве тонкопленочного покрытия триботехнического назначения. При этом следует особенно подчеркнуть, что кривые изнашивания стали с покрытием, рис.8, свидетельствуют о существенном вкладе подповерхностного слоя стали в несущую способность и ресурс пары. Это слой является модифицированным в процессе обработки за счет диффузии элементов электрода в стальную твердую фазу. Есть основания полагать, что роль собственно покрытия (толщина которого составляет несколько микрон), судя по кривой 2, рис.8 (износ составляет величину, на порядок большую), сводится в основном к приработочным эффектам, обеспечивающим совместимость материалов сопряжения и достижение парой установившегося режима трения. Дальнейшую работоспособность пары обеспечивает модифицированный подповерхностный слой стали. Аналогичные процессы при трении покрытия на стали и чугуне в паре со сталью наблюдаются, например, когда покрытие из медного сплава нанесено методом финишной антифрикционной безабразивной обработки [14], при этом ресурс работоспособности пары за счет модифицированного подповерхностного слоя стали существенно продлевается.

Заключение. Экспериментально подобраны режимы электроискрового легирования стали 30ХГСН2А медными сплавами состава БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6. Показано, что для устранения выгорания фосфора при легировании бронзой БрМцФ3-6 процесс следует проводить в защитной атмосфере аргона. Для предотвращения обратного массопереноса материала подложки в покрытие при легировании в среде аргона необходимо ограничить число рабочих импульсов тока за счет ограничения тока зарядка конденсаторов.

Рекомендуется следующий режим ЭИЛ: величина импульса тока, 1–1,05 А; скорость вращения, об/мин – 1,2; продольная подача, мм/об – 1–1,1; число проходов 4, обкатка роликами. Принятый режим обработки обеспечивает формирование сплошного и равномерного по толщине слоя покрытия.

Приведенные характеристики трения и износа стальной пары с антифрикционными бронзовыми покрытиями, полученными методом электроискрового легирования, показали, что бронзы марок БрАЖМц10-3-1,5 и БрМцФ3-6 могут быть рекомендованы в качестве материала покрытий на стали 30ХГСН2А для тяжело нагруженных узлов трения. Используемые разработанные режимы процесса электроискрового нанесения покрытий выявили их триботехническую эффективность.

Список литературы

1. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя при электроискровом легировании. - Владивосток: Дальнаука, 1995. - 322с.

2. Иванов В.И. Электроискровое легирование кузнечного производства: Ч.1. Принципы увеличения износостойкости // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2015. – №1. – С. 22–26.
3. Иванов В.И. Электроискровое легирование кузнечного производства: Ч.2. Элементы технологии // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2015. – №9. – С. 23–26.
4. Кайгородов Н.Г. Электроискровое легирование как способ повышения стойкости инструмента // Сб. материалов III Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего (г. Кемерово, 11-12 августа 2016 г.). - Кемерово: ООО «Западно-Сибирский научный центр», 2016. - Т.2. - С.119–121.
5. Купцов С.Г., Фоминых М.В., Мухинов Д.В., Магомедова Р.С., Никоненко Е.А., Плещев В.П. Электроискровое легирование твердых сплавов ВК8, Т15К6 // Расплавы. – 2015. – №4. – С. 87–89.
6. Логинов Н.Ю. Увеличение ресурса режущего инструмента методом электроискрового легирования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Тольятти, 2005. – 140с.
7. Иванов В.И., Костяков А.Ю. Электроискровое нанесение покрытий // Ритм машиностроения. – 2016. – №10. – С. 36–41.
8. Канарчук В.Е., Венедиктов В.А., Соловейкина А.К. Повышение износостойкости и уровня выносливости деталей и узлов авиационной наземной техники // Трение и износ. – 1985. – Т.VI. - №3. – С.493–498.
9. Дякин С.И. Методы повышения несущей способности тяжело нагруженных пар / Задачи нестационарного трения в машинах, приборах и аппаратах. - М.: Наука, 1978. - С.202–208.
10. Овчинников В.В., Козлов Д.А. Влияние марки бронзы на свойства стали 30ХГСН2А при электроискровом легировании // Машиностроение и инженерное образование. – 2008. – №1. – С.33–40.
11. Коротаев Д.Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием. - Омск: СибАДИ, 2009. - 255с.
12. Перетятку В.С. Эффект квазирегулярной осцилляции интенсивности массопереноса при электроискровом легировании в магнитном поле // Электронная обработка материалов. – 2007. – №2. – С.17–19.
13. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. и др. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Под общей ред. А.В.Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2001. - 664с.
14. Гаркунов Д.Н. Триботехника. Конструирование, изготовление и эксплуатация машин. - М.: изд-во МСХА, 2002. - 632с.

Дата поступления: 13 мая 2019 г.