УДК 620.179. 112

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАНЕСЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ТЕХНОЛОГИЯМИ ФИНИШНОЙ АНТИФРИКЦИОННОЙ БЕЗАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

А.В.РАГУТКИН¹, М.И.СИДОРОВ¹, М.Е.СТАВРОВСКИЙ²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

² НИИ «Центр экологической промышленной политики», Московская область, г.Мытищи, Россия

В статье приведен анализ эффективности антифрикционных покрытий, получаемых финишной антифрикционной безабразивной обработкой (ФАБО), в том числе и обработкой в металлоплакирующих технологических средах, с целью повышения эксплуатационных показателей деталей машин. Проведен анализ применения технологий нанесения покрытий ФАБО на материалах, работающих при повышенной температуре и при высоком давлении, а также с высокими значениями потоков энергии в окружающей среде. Представлены результаты применения различных композиций плакирующих элементов и технологий ФАБО для различных изделий машиностроения. Результаты исследований применения разработанных с участием авторов технологий ФАБО подтверждают их высокую эффективность для повышения износостойкости материалов артиллерийских стволов. Снижение износа в пределах от двух до трехкратного по сравнению со штатной технологией. Полигонные испытания антифрикционных противоизносных покрытий, выполненные специалистами ФКП НИИ «Геодезия», подтвердили перспективность этого направления для повышения живучести артиллерийских стволов.

Ключевые слова: покрытия; присадки; приработка; износ; ресурс; детали машин

Как цитировать эту статью: Рагуткин А.В. Некоторые аспекты эффективности нанесения антифрикционных покрытий технологиями финишной антифрикционной безабразивной обработки / А.В.Рагуткин, М.И.Сидоров, М.Е.Ставровский // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 239-244. DOI 10.31897/PMI.2019.2.239

Введение. Технология финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) основана на эффекте переноса металла при трении и тесно связана с открытием явления «избирательного переноса» советскими учеными Д.Н.Гаркуновым и И.В.Крагельским. Среди покрытий, получаемых технологиями ФАБО, широкое распространение получил метод латунирования для обработки деталей цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и дизелей. По результатам многочисленных испытаний определено, что ресурс ДВС повышается до 30 % при сокращении расхода горючего на 3-5 %. Установлено повышение износостойкости взаимодействующих материалов деталей в 2-4 раза. Для формирования антифрикционных покрытий [5, 10, 11, 13-16] оптимальная шероховатость поверхности перед их нанесением должна составлять 0,06-0,60 мкм. При нанесении на поверхность стальной детали латуни формируется слой толщиной 2-3 мкм, а при меднении и бронзировании – толщиной 1-2 мкм [11, 13, 15, 16]. Для создания на поверхности стальной детали сплошного ровного слоя плакирующего металла процесс трения должен происходить при повсеместном, равномерном схватывании поверхностей обрабатываемой детали и инструмента и перенос осуществляться не отдельными крупными частицами, а сплошным слоем с хорошей адгезией.

Формирование антифрикционного покрытия на поверхности стали происходит также при обработке трением с помощью инструмента из различных материалов (фетр, резина и др.) в присутствии технологической металлоплакирующей среды, содержащей поверхностно-активные вещества (ПАВ) и соли металла. Например, в состав технологической среды могут входить следующие компоненты, % по массе: глюкоза – 1-5; хлорид меди (I) – 2-5; оксид кремния – до 4; глицерин – остальное [1]. Результаты исследований покрытий, полученных с применением данной композиции, показали, что при работе пары трения сталь с покрытием (алюминиевый сплав АЛ30 в маслах И-20А и ХФ12-16 на воздухе и хладоне 12) при удельной нагрузке 5 МПа позволяет снизить интенсивность изнашивания деталей в 2-2,5 раза. Отмечено снижение коэффициента трения на 20 % и сокращение времени приработки поверхностей образцов в 2 раза.

Обсуждение. Нанесение покрытия на сталь и чугун осуществляли [2] с помощью эластичного инструмента из полиуретана, пропитанного композицией, содержащей соли меди неорганических кислот. Разработанный авторами состав для изготовления инструмента содержит: древесную муку, полиэтиленгликоль, соль меди и полиуретан. Нанесение покрытия по данной технологии проводится при скорости скольжения детали и инструмента до 2,5 м/с и усилия прижатия

до 1,5 МПа. Для интенсификации процесса обработка деталей производится в смазочно-охлаждающей технологической среде. Триботехнические испытания образцов из стали 45 с данным покрытием при удельной нагрузке 2,0 МПа в масле И20А показали, что покрытие обеспечивает повышение износостойкости поверхности материалов до 2 раз.

Для нанесения композиционных покрытий, позволяющих снизить энергетические потери на трение, авторами разработаны [3] металлоплакирующие технологические среды, в состав которых дополнительно вводятся фторорганические соединения, а также хлорид меди, глюкоза, оксид кремния и глицерин. Роль восстановителя в данном составе выполняет глюкоза. Оксид кремния обеспечивает повышение вязкости среды и снижение расхода компонентов. Активация поверхности обрабатываемой детали происходит благодаря абразивному воздействию оксида кремния и наличию альдегидных групп в глюкозе. По мнению авторов, в процессе обработки фторсодержащие радикалы связываются с медью и образуют комплексное покрытие, которое обеспечивает хорошие антифрикционные свойства. Сделанное авторами [3] предположение подтверждается данными рентгеноспектрального анализа. За счет гидрофобного взаимодействия углеводородных и фторуглеродных цепей на поверхности трения деталей задерживается некоторое количество смазочной среды, что обеспечивает трение с малыми энергетическими затратами по принципу диффузионно-вакансионного механизма. Триботехнические испытания образцов из стали 45 показали снижение коэффициента трения материалов с таким покрытием в 1,9 раза в сравнении с покрытием, полученным без фторорганических компонентов, при одновременном увеличении износостойкости покрытия в 3 раза и снижении периода приработки до 1,4 раза.

В работе [17] предложен состав композиции для нанесения покрытия, в которую входят карбонат меди, соляная кислота, глицерин и фторорганическое соединение. Механизм образования композиционного покрытия аналогичен приведенному. Наличие соляной кислоты обуславливает необходимость применения данного состава для нанесения покрытий на стали с высоким содержанием легирующих элементов. Результаты лабораторных испытаний данного покрытия показали снижение потерь на трение до 1,8 раз, повышение износостойкости до 2 раз и сокращение времени приработки поверхностей деталей до 2,5 раз.

Авторами [17] также рекомендован состав металлоплакирующей композиции из глицерина, тетрафторобората меди, натрия лимонно-кислого трехзамещенного, бихромата калия, ортофосфорной кислоты и воды. Применение ортофосфорной кислоты, по мнению авторов, позволяет интенсифицировать процесс образования покрытия на легированных сталях и обеспечить повышение его антикоррозионных свойств. Триботехнические испытания образцов из стали с данным покрытием показали снижение коэффициента трения до 1,5 раз и интенсивность изнашивания до 2 раз. Данный состав рекомендован [17] к применению для нанесения покрытий на детали из стали, чугуна и алюминия.

В работе [4] предложен метод формирования антифрикционных покрытий в процессе обкатки деталей узлов в штатных смазочных материалах, содержащих металлоплакирующие присадки. Результаты стендовых испытаний узлов холодильных агрегатов, обкатанных с применением данной технологии, подтверждают ее эффективность. Исследования структуры материалов после обкатки доказали формирование покрытия на поверхностях деталей. Применение данной технологии рекомендовано для неразборных или уже собранных узлов и целесообразно в случаях, когда невозможно подвергнуть обработке каждую деталь в отдельности (например, для подшипников качения). После обкатки узлы должны быть промыты, а остатки металлоплакирующей среды удалены из полостей корпуса и с поверхностей деталей.

Для реализации технологии обкатки разработан состав, содержащий карбонат меди, соляную кислоту и глицерин. Применение данного состава апробировано также для формирования покрытий на деталях коробок скоростей станков, редукторов различного оборудования и в подшипниках качения. Время обработки на холостом ходу в зависимости от применяемых материалов деталей 1-5 мин. Применение технологии позволило сократить период технологической операции обкатки холодильных агрегатов на предприятии до 1,5 раз. При этом отмечено снижение рекламаций со стороны потребителей по отказам агрегатов, которые обусловлены задирами и заклиниванием деталей и увеличение срока службы агрегатов до 2 раз.

Если невозможно полностью удалить обкаточную среду из узла трения, разработан следующий состав [12], % по массе: неорганическая кислота – 0,001-0,2; одноатомный спирт – 0,1-2,0; металлсодержащая добавка – 0,5-5,0; масло – остальное. По данным [12], использование данного состава обеспечило сокращение времени приработки коробки скоростей токарно-винторезного станка в 3 раза и повысило срок его службы на 30-40 %.

Технологии нанесения покрытий с применением металлоплакирующих технологических сред прошли апробацию [8, 9] на изделиях бытовой техники (кухонный процессор), на основных механизмах швейных машин челночной системы, на лезвийном инструменте машин скользящего резания коженно-обувных и текстильных материалов (установлено снижение износа в 1,8-2,5 раза), на режущей кромке ножей лушильных и стружечных станков и др.

Коллективом авторов Института машиноведения им. А.А.Благонравова, Российского университета туризма и сервиса, НИИ «Геодезия», Московского агроинженерного университета им. В.П.Горякина проведены исследования двигателей машин ГАЗ-24, ЗИЛ-130 и КАМАЗ-740, включая лабораторные, стендовые и эксплуатационные испытания образцов и деталей цилиндропоршневой группы, обработанных различными технологиями ФАБО. По результатам испытаний сделаны следующие выводы:

- интенсивность изнашивания пары коленчатый вал – вкладыш, обработанных ФАБО в 1,5-7 раз ниже по сравнению с результатами необработанных деталей при работе в интервалах удельных давлений 10-25 МПа;
- ФАБО позволяет сократить время приработки материалов деталей до 40 %, снизить суммарный приработочный износ на 50-60 %, а коэффициент трения на 12-20 %;
- ФАБО снижает интегральную интенсивность износа на 40 % и существенно повышает стойкость материалов деталей к задирам.

Стендовые испытания двигателя ЗИЛ-130 с ФАБО шеек коленчатого вала показали, что метод эффективен при переменных нагрузках и пониженном давлении масла, т.е. при условиях режима технологической и эксплуатационной приработки двигателя.

Полученные результаты эксплуатационных испытаний двигателей КАМАЗ-740 показали, что интенсивность изнашивания гильз, подвергнутых ФАБО, при пробеге автомобиля 55 тыс.км более чем в 5 раз ниже, чем у необработанных гильз, а при пробеге автомобиля более 90 тыс.км ниже в 2,3 раза.

Полигонные и стендовые испытания технологии ФАБО, выполненные на дизельной технике специального назначения, показали снижение интенсивности изнашивания деталей в 1,4-2 раза. Стендовые испытания топливно-регулирующей аппаратуры двигателей летательных аппаратов показали снижение износа поверхностей наиболее нагруженных деталей узлов, обработанных ФАБО в металлоплакирующих средах, до 4,5 раз. Положительные результаты показаны на лабораторных и стендовых испытаниях плунжерных насосов в составе гидроагрегатов [8, 9].

В ходе апробации металлоплакирующих композиций установлено повышение срока службы погружного центробежного насоса (типа ЭЦНМ), предназначенного для работы в тяжелых условиях при откачке из нефтяных скважин пластовой жидкости, имеющей температуру 140 °С и содержащей 99 % попутной воды и твердых абразивных частиц с массовой концентрацией 0,01 %.

Ремонтные предприятия железных дорог [5], ремонтные заводы системы «Ремпутьмаш» и предприятия, эксплуатирующие выправочно-подбивочно-рихтовочные машины (ВПр и ВПрС), обеспечиваются рабочей средой РСТМ-1 и концентратом присадок ПЖТМ-1, которые вводятся в жидкие и твердые смазочные материалы с целью улучшения их противоизносных и антифрикционных характеристик. Результаты производственных испытаний подбивочного блока машин ВПр показали улучшение параметров его работы, а износостойкость быстроизнашивающихся деталей была повышена на 30 %.

Апробации технологий нанесения покрытий с применением металлоплакирующих сред для повышения живучести стволов артиллерийских орудий и стрелкового оружия посвящены работы [6, 7]. Отмечается [6], что существуют составы металлоплакирующих композиций, способных при определенных условиях взаимодействия материалов обеспечивать протекание процессов «самоорганизации в термодинамически выгодном направлении». Эффект пассивации поверхностей трения происходит за счет введения в смазочный материал присадок: органических соеди-

нений (фторопласт, жирные кислоты и др.); металлов (Co, Ni, Cu, Zn и др.); катализаторов (Pt, Pd, фуллериды и др.); керамики на основе Nb, Ta, Zr и др.; металлов, растворенных в органическом соединении, наполнителей (соединений в порошкообразном виде), которые формируют антифрикционное покрытие или поверхностный слой с улучшенными антифрикционными свойствами.

Проведенные в ЦКИБ СОО исследования показали, что для стрелкового оружия эффективно применение полифункционального состава «Живой металл» (СПФ «ЖМ»), разработанного в НИИ Специальных технологий. Состав представляет собой комплекс определенным образом обработанных составов из катализаторов, керамики и органических структур. В состав СПФ «ЖМ» входят специальные и металлоорганические системы и минералы, что придает СПФ способность к формированию неоднородных (металл – керамика – органические соединения) защитных покрытий, имеющих высокое сопротивление охрупчиванию при механическом и термическом воздействии. Каталитические системы в СПФ снижают диффузию водорода в поверхностные слои материалов, не допускают снижения прочности поверхностного слоя при диффузии дисперсионно-упрочняющих элементов из поверхностных слоев в более глубокие.

Апробация способа [6] на моделях спортивно-охотничьего и снайперского оружия показала, что полученное покрытие не уступает по износостойкости покрытию из хрома и превосходит его по работоспособности, внутренней и внешней баллистике. Применение СПФ «ЖМ» позволило увеличить живучесть стволов 12,7-миллиметровой снайперской винтовки в 2-2,5 раза при стрельбе моноблочными и оболочечными пулями.

Первичная апробация металлоплакирующих составов с целью повышения живучести стволов была выполнена при полигонных испытаниях пушки МТ-12 (ФКП НИИ «Геодезия», 2001 г.). Перед стрельбой на очищенную и обезжиренную поверхность канала ствола № 1189 был нанесен металлоплакирующий антифрикционный противоизносный состав объемом 58 см³. Ранее из данного ствола было произведено 64 выстрела с БПС. На ведущие пояски снарядов перед каждым выстрелом наносился тонкий слой состава оригинальной металлоплакирующей композиции.

Полигонные испытания защитного покрытия, нанесенного при помощи металлоплакирующих противоизносных составов, проводились стрельбой бронебойно-подкалиберными снарядами в количестве 20 выстрелов в каждый день испытаний. Всего из пушки произведено 100 выстрелов. После отстрела каждой группы выстрелов (20 шт.) пушка выдерживалась в течение суток при комнатной температуре, после этого производился обмер канала ствола механической звездочкой через каждые 50 мм, а в сечениях, прилегающих к зарядной камере (930; 1050; 1260; 1380; 1500 мм), обмер производился прибором контроля износа.

Дополнительно была произведена серия испытаний из 44 выстрелов из изношенного ствола после 200 выстрелов. При анализе результатов из рассмотрения были исключены выстрелы обычными снарядами, так как по данным обмеров после проведения серии из 34 выстрелов такими снарядами существенного износа не было обнаружено как до стрельб, так и после них. Износ в сечениях 1260; 1380 и 1500 мм составил 2,6; 2,2 и 2,0 мм соответственно. Кроме того, не учитывались результаты замеров перед 44 выстрелами подкалиберными снарядами, так как перед этим в течение 7,5 лет стрельбы из ствола не производились, вследствие чего ствол покрылся коррозионной пленкой, не полностью удаленной даже при тщательной чистке: вместо этого были использованы результаты промежуточных замеров после 22 выстрелов подкалиберными снарядами и замеров после 44 выстрелов, проводившихся прибором ПКС в течение суток.

По результатам испытаний определено, что износ очень велик на начальном участке, но резко падает по мере приближения к дульному срезу, причем износ у дульного среза становится заметным только после проведения всех стрельб. Темп износа на последних 44 выстрелах, проведенных по антиизносной технологии, резко падает по сравнению с износом на предыдущих 137 выстрелах, проведенных по штатной технологии. В среднем темп износа падает в 3 раза – с 1,8 до 0,6 мм на один выстрел. Снижение износа в пределах от двух до трехкратного по сравнению со штатной технологией.

Еще одна серия полигонных испытаний защитного покрытия была выполнена с использованием танковой пушки (НИИ «Геодезия»). Износостойкость защитного покрытия, нанесенного на поверхность канала ствола, проводилась стрельбой бронебойно-подкалиберными снарядами в количестве 35 выстрелов.

Перед проведением работ поверхность канала ствола была зачищена с использованием механизма чистки ствола из состава передвижного комплекса и обезжирена бензином. Затем была измерена величина и определен характер износа канала ствола прибором ПИНТ (прибор измерения непрямолинейности трубы) с инструментальной погрешностью 0,01 мм.

После проведения начальных измерений на поверхность канала ствола был нанесен противоизносный состав путем возвратно-поступательных движений банника (120 циклов). Затем произведен отстрел двух групп по 7 выстрелов в группе и одной группы из 14 выстрелов, одной группы из 7 выстрелов («Изделие ЗБМ42»), на ведущие пояски которых перед стрельбой наносился другой состав. После отстрела каждой группы ствол чистился, вытирался насухо, затем производился обмер канала ствола прибором ПИНТ.

В процессе всех стрельб фиксировались начальная скорость и техническое рассеивание рядов на дистанции 100 м. Для оценки износостойкости ствола по полученным результатам были построены экспериментальные зависимости износа от выстрела по результатам стрельб однотипными снарядами «Изделие ЗБМ42» из четырех стволов, проведенными в ФКП НИИ «Геодезия» без применения антиизносной технологии.

Осредненные зависимости показали, что в пределах 120 выстрелов зависимость износа от количества выстрелов носит линейный характер, так как отклонения средних значений износа на всех графиках от прямой незначительны по сравнению с отклонениями от ствола к стволу. Из полученных данных определено, что в процессе применения «безыносной» технологии на поверхность канала ствола защитного покрытия износостойкость увеличивается в 2,2 раза.

При использовании вместо линейных зависимостей средних экспериментальных в области от 0,5 до 1,0 мм, коэффициент износостойкости увеличивается до 3-3,5 (в сечении 1000 мм удельный износ в этой области равен не 0,015 мм, а 0,022 мм, соответственно коэффициент износостойкости возрастает до 3,2). Таким образом, полигонные испытания антифрикционных противоизносных покрытий, выполненные специалистами ФКП НИИ «Геодезия», показали перспективность этого направления для повышения живучести артиллерийских стволов. Систематические исследования предполагают обзор и оценку опыта, наработанного в этом и смежных направлениях.

Заключение. Анализ рассмотренных работ позволяет сделать следующий вывод. Для повышения долговечности артиллерийских стволов имеется большой научно-технический потенциал в области антифрикционных противоизносных покрытий. Этот ресурс может быть активно использован для обеспечения модернизации системы полигонных испытаний артиллерийских стволов. В связи с этим в настоящее время ведется разработка соответствующих теоретических и методологических основ по верификации моделей и валидации результатов испытаний.

Благодарность. Исследования проведены при поддержке РТУ МИРЭА в рамках инициативной научно-исследовательской работы ИЦМР-7 «Предиктивные технологии обработки информации о состоянии узлов машин и оборудования».

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 1203126 СССР. Состав для нанесения покрытий / А.К.Прокопенко, С.И.Голина, Д.Н.Гаркунов и др. Оpubл. 07.01.1986. Бюл. № 1.
2. А.с. 1686033 СССР. Способ нанесения антифрикционных покрытий на детали узлов трения / А.К.Прокопенко, Е.А.Воронин, М.М.Юдин и др. Оpubл. 23.10.1991. Бюл. № 39.
3. А.с. 1282860 СССР. Способ приработки сопрягаемых поверхностей трения / А.К.Прокопенко, В.Н.Быстров, Д.Н.Гаркунов и др. Оpubл. 15.01.1987. Бюл. № 2.
4. А.с. 1622671 СССР. Состав для приработки деталей узлов трения / А.К.Прокопенко, В.М.Юдин. Оpubл. 23.01.1991. Бюл. № 3.
5. Гаркунов Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безыносности при трении. Водородное изнашивание металлов / МСХА. М., 2004. 384 с.
6. Зеленко В.К. Повышение живучести стволов стрелкового оружия путем применения противоизносных триботехнических составов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. № 1. С. 252-260.
7. Карюкин С.П. Подход к обеспечению живучести стволов артиллерийских орудий / С.П.Карюкин, О.В.Митрохин // Военная мысль. 2012. № 1. С. 72-78.
8. Комплекс технологий нанесения многофункциональных покрытий для повышения работоспособности деталей машин / С.Г.Емельянов, Е.А.Лукашев, А.В.Олейник, М.Е.Ставровский, В.А.Фролов, А.Ф.Пузряков // Технология машиностроения. 2009. № 9. С. 33-35.

9. Методы трибохимических исследований / Е.А.Лукашев, М.Е.Ставровский, А.В.Олейник, С.Г.Емельянов, В.М.Юдин / Курск. технический ун-т. Курск, 2006. 282 с.
10. Патент 2119552 РФ. Способ обработки поверхности детали узла трения и устройство для его осуществления / Ф.Х.Бурумкулов, А.В.Беляков, В.М.Кремешный, Л.М.Лельчук. Оpubл.27.09.1998.
11. *Польцер Г.* Основы фрикционного нанесения покрытий в условиях селективной передачи // Ремонт, восстановление, модернизация. 2010. № 10. С. 23-28.
12. *Стрельцов В.В.* Ускорение приработки деталей во время стендовой обкатки отремонтированных двигателей внутреннего сгорания (на примере 3МЗ-53 и ЗИЛ-130): Автореф. дис ... д-ра техн. наук / МГАУ. М., 1993. 41 с.
13. *Терхунов А.Г.* Метод финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) цилиндров и коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания // Трение, износ и смазочные материалы: Труды Межд. науч. конф. Ташкент: Изд-во АН Узбекской ССР. 1985. Т. 5. С. 3-4.
14. Технологии нанесения многофункциональных покрытий на детали машин / С.Г.Емельянов, Е.А.Лукашев, А.В.Олейник, М.Е.Ставровский, В.А.Фролов, А.Ф.Пузряков // Сварочное производство. 2010. № 8. С. 47-49.
15. *Турчков Е.В.* Финишная антифрикционная безабразивная обработка поверхностей трения // Фрикционное взаимодействие твердых тел с учетом среды / Ивановский государственный университет. Иваново, 1982. С. 135-138.
16. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и избирательный перенос / Г.Польцер, А.Фирковский, И.Ланде и др. // Долговечность трущихся деталей машин: Сб. статей. Вып. 5. М.: Машиностроение, 1990. С. 86-122.
17. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) деталей / В.В.Стрельцов, И.Л.Приходько, С.С.Некрасов и др. / ОНТИ ПНЦ РАН. Пушкино, 1996. 107 с.

Авторы: **А.В.Рагуткин**, канд. техн. наук, проректор по инновационному развитию, ragutkinav@gmail.com (МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия), **М.И.Сидоров**, канд. техн. наук, заместитель начальника отдела инжинирингового центра, mihail.sidorov0213@gmail.com (МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия), **М.Е.Ставровский**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, m.stavrovsky@eipc.center (НИИ «Центр экологической промышленной политики», Московская область, г.Мытищи, Россия).

Статья поступила в редакцию 15.05.2018.

Статья принята к публикации 27.08.2018.