

УДК 621.8

DOI:10.30987/2223-4608-2020-2021-1-8-14

В.П. Матлахов, к.т.н.

(Брянский государственный технический университет
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7)

E-mail: Jed80@mail.ru

Повышение долговечности поверхностей трения с покрытиями электромеханической обработкой

Рассмотрена технология повышения долговечности поверхностей трения на основе сочетания методов нанесения покрытий и последующей электромеханической обработки. Выявлены возможности такой обработки и приведены результаты сравнительных испытаний.

Ключевые слова: долговечность; износостойкость; нитрид-титановые покрытия; электромеханическая обработка.

V.P. Matlakhov, Can. Sc. Tech.

(FSBEI HE "Bryansk State Technical University",
7, 50-th October Boulevard, Bryansk, Russia, 241035)

Life increase in friction surfaces with coatings with electro-machining

A technology for life increase in friction surfaces on the basis of the combination of coating methods and further electro-machining is considered. The possibilities for such processing are revealed and the results of comparative trials are shown.

Keywords: life; wear-resistance; nitride-titanium coatings; electro-machining.

Рабочие параметры изделия определяются во многом состоянием поверхностного слоя, низкое качество которого приводит к неоправданно высоким затратам при использовании продукции и, как следствие, ее неконкурентоспособности. Потеря долговечности цилиндрических деталей, работающих в тяжелых условиях граничного трения, происходит при их износе менее десятых долей миллиметров, поэтому использование дорогостоящих и чрезмерно-дефицитных материалов в полном объеме изделия практически всегда нецелесообразно. Экономически оправдано применение материалов с поверхностными покрытиями, обеспечивающими требуемые эксплуатационные свойства (в частности, износостойкость).

Одной из таких перспективных технологий являются методы физического осаждения покрытия (ФОП), получившие название в мировой практике PVD (Physical vapor deposition). Методы физического осаждения покрытий универсальны по возможности получения твердых покрытий на базе соединений тугоплавких металлов IV-VI групп периодической системы элементов

(нитридных, карбидных, карбонитридных, оксидных, боридных и других), но наибольшее распространение получили нитрид-титановые покрытия с катодом выполненным из титана. Самое большое распространение среди данных методов получил метод конденсации покрытия из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой поверхности (метод КИБ) [1].

Нанесение твердых покрытий в вакууме производилось на установке ионно-плазменного напыления «Пуск-83» с торцовым электродуговым испарителем и водоохлаждаемым катодом из титана марки ВТ-1 (рис. 1).

Преимущества этого метода обусловлены его уникальными сочетаниями характеристик: универсальностью и пригодностью для любых материалов; высокой твердостью, теплостойкостью, сопротивляемостью микро- и макро-разрушениям; пассивностью по отношению к контртелу; относительно малой энергозатратностью и, как следствие, экономичностью технологического процесса; отсутствием прямого контакта обрабатывающего инструмента

с обрабатываемым материалом; широким диапазоном удельных мощностей воздействия (от 0,1 до 10¹¹ Вт/см); высокой управляемостью и воспроизводимостью параметрами процесса для получения требуемых характеристик покрытия; возможностью ускорения ионов металла отрицательным зарядом на детали; небольшой инерционностью технологического процесса; возможностью быстрой перестройки и совмещения различных операций; возможностью локального и селективного воздействия на деталь; экологически чистой технологией [1, 2].



Рис. 1. Установка «Пуск-83»

Материал с покрытием КИБ фактически является композиционным, так как в нем оптимально сочетаются свойства поверхностного слоя, обусловленные самим покрытием, и свойства исходной структуры основной массы конструкционного материала детали, таких как прочность, ударная вязкость, трещиностойкость и т.д.

Метод КИБ применяется для поверхностного упрочнения тяжело нагруженных деталей, эксплуатирующихся при высоких температурах в условиях контактных взаимодействий, адгезионного и диффузионного изнашивания. Такие тяжелые условия эксплуатации характерны для рабочих элементов: штампов, пресс-форм, металлообрабатывающего инструмента, приспособлений и ряда деталей машин [1, 2].

Литературные данные свидетельствуют о существенном повышении стойкости обрабатываемого инструмента при нанесении таких покрытий, но при этом возможны низкая прочность сцепления с подложкой из-за разности свойств, а также наличие структурных дефектов покрытия, способных вызвать процесс микрорезания ответной детали [2, 4].

Анализ отделочно-упрочняющих методов обработки показывает, что одним из эффективных способов добиться приемлемых параметров качества поверхностного слоя за счет оплавления и сглаживания наиболее крупных дефектов покрытия и уменьшить резкий перепад механических свойств в переходной зоне «покрытие – основа» может быть электромеханическая обработка (ЭМО), вызывающая структурно-фазовые изменения поверхностного слоя, так как огромная твердость и тонкослойность таких покрытий (4...5 мкм) создают неизбежные трудности применения обычных методов резания и пластического деформирования [2, 4, 6].

Технология ЭМО реализуется на установке, разработанной в БГТУ и представляет собой токарно-винторезный станок мод. 1К62 с силовым блоком для преобразования промышленного электрического тока, выполненного в виде отдельных, сопрягаемых между собой элементов; блоком управления режимами обработки; средствами коммутации и подвода СОТС (рис. 2).



Рис. 2. Установка для проведения ЭМО

Для ЭМО была разработана и изготовлена оригинальная инструментальная головка с вертикальным расположением обрабатываемых элементов: роликов из сложного спеченного материала (рис. 3). Для отвода тепла и возможности структурно-фазовых изменений при ЭМО с помощью системы охлаждения станка через полости роликов и в зону упрочнения подводится СОЖ, представляющая собой экспериментально подобранный раствор электролита [6].

Испытания на износостойкость в условиях граничной смазки проводились по схеме «вал – неподвижная колодка» с использованием

АСНИ для проведения испытаний на трение и изнашивание, созданной в Учебно-научном технологическом институте БГТУ на базе серийной машины трения «МИ-1М» с использованием нагружающего устройства оригинальной конструкции (рис. 4) [3].

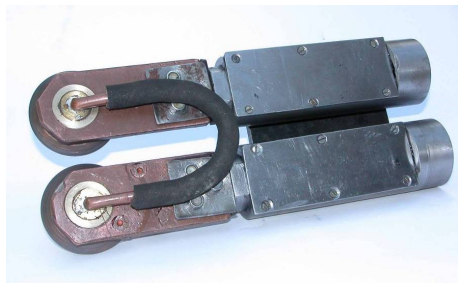


Рис. 3. Инструмент для проведения ЭМО

Условия проведения испытаний принимались исходя из анализа работы деталей с цилиндрическими поверхностями трения в распространенных типовых узлах трения. Испытания проводились в условиях режима гра-

ничной смазки. Это обеспечивалось погружением части образца в смазочный материал – масло индустриальное И-20А (ГОСТ 20799-75). Скорость скольжения $v = 1,0$ м/с; нагрузка на индентор $P = 500$ Н. В качестве материала индентора использовалась легированная конструкционная сталь марки 20Х2Н2М, после цементации и последующей закалки до твердости 61...63 HRC₂ [2].

Информация, полученная с соответствующих датчиков, проходит через усилители, передается на компьютер через плату сбора данных PCI-6220 фирмы National Instruments, обрабатывается с помощью ЭВМ и специального программного обеспечения на базе SCADA-системы LabVIEW в процессе испытаний и отображается на мониторе. Система контролирует и обрабатывает в реальном времени следующие параметры испытания: нагрузку на образцы, момент трения, температуру, суммарный линейный износ. После завершения испытаний программа автоматически генерирует отчет в формате html.

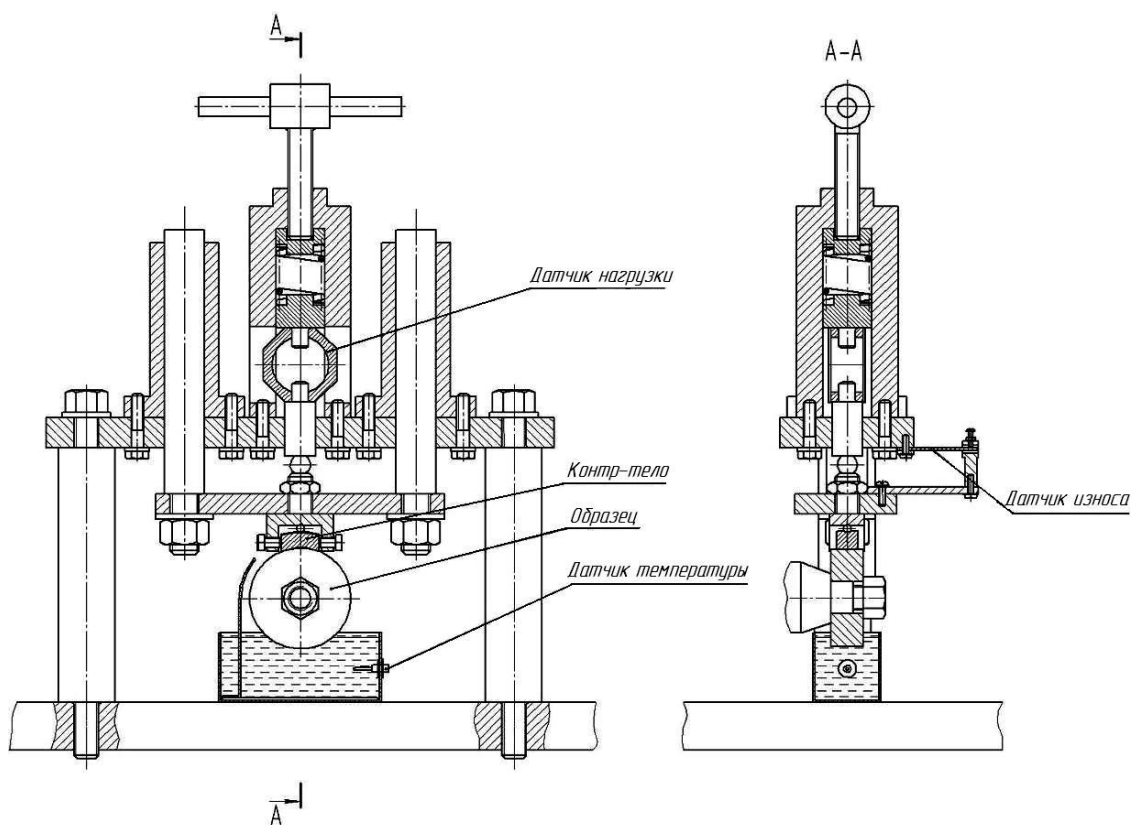


Рис. 4. Нагружающее устройство «МИ-1М»

Детали, работающие в парах трения-вращения (валы, оси, втулки), изготавливают из конструкционных и легированных сталей, к которым предъявляются требования по прочности, обрабатываемости, нечувствительности

к изломам и способности подвергаться термической обработке. Самой часто применяемой для такого рода деталей сталью является сталь 45 (ГОСТ 1050-88), поэтому образцы для проведения испытаний изготавливались из стали 45.

Испытуемая поверхность образцов перед проведением экспериментов подготавливалась на токарно-винторезном станке мод. 16К20 точением со следующими режимами обработки: глубина резания $t = 0,5$ мм; подача $S = 0,1$ мм/об; скорость резания $v = 75$ м/мин. Последующее круглое шлифование проводилось врезным шлифованием на круглошлифовальном станке мод. 3Е12 периферией круга марки 25А/40/М2/6К/Б/2 350×40×127 (ГОСТ 2424-83) с режимами обработки: скорость круга $v_{кр} = 30$ м/с; скорость детали $v_d = 20$ м/мин.

В результате проведения ряда предварительных исследований и на основе рекомендаций по литературным данным, были выявлены оптимальные параметры представленных покрытий. Так, наибольшее влияние оказало давление азота, при низком давлении которого образуются покрытия с большим содержанием капельной фазы, снижающей прочность их сцепления, а при высоком происходит значительное увеличение количества пор и отслоений из-за большого числа незанятых ионов азота.

Нанесение нитрид-титановых покрытий проходило следующим образом: предварительная механическая очистка, ультразвуковая и химическая подготовки поверхности растворителями; бомбардировка ионами аргона на вращающемся рабочем столе в центре камеры с подачей отрицательного потенциала на образцы при напряжении 800...900 В и при давлении аргона 1,0...4,0 Па, осуществляющая очистку поверхности; термомеханическая активация образцов ионами титана в течение трех минут при напряжении 600...700 В; осаждение нитрид-титана при давлении азота 350 МПа, токе дуги 125 А, в течение пяти минут. После напыления толщина покрытия составила 4,0...5,0 мкм, твердость до 1400 HV [1, 2, 4, 6].

Для выявления возможностей ЭМО, было проведено исследование распределений твердости по глубине и параметров шероховатости (Ra , Rq , Rz , $Rmax$, Rp) для различных видов токов (рис. 5, 6).

Микротвердость в обоих случаях достигает 1000 единиц твердости по Виккерсу. Как видно из графиков применение переменного тока обеспечивает аналогичную микротвердость поверхности, более плавное изменение микротвердости по глубине и более высокие параметры шероховатости. Главный вывод из проведенных экспериментов заключается в том, что применение постоянного тока необходимо

при обеспечении высоких требований к параметрам шероховатости обработанной поверхности, а переменного тока – для получения высокой микротвердости и глубины упрочнения [2, 6].

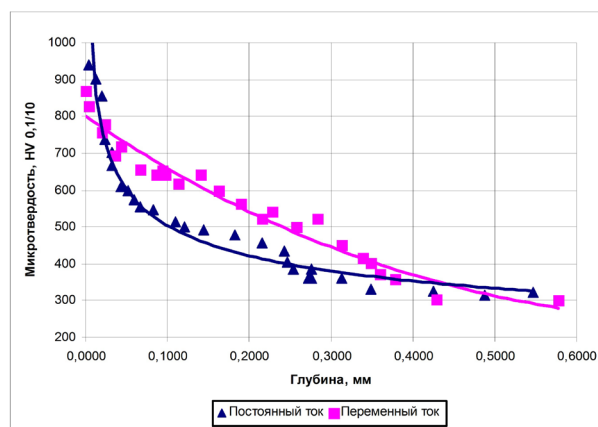


Рис. 5. Распределение микротвердости образцов с ЭМО от глубины

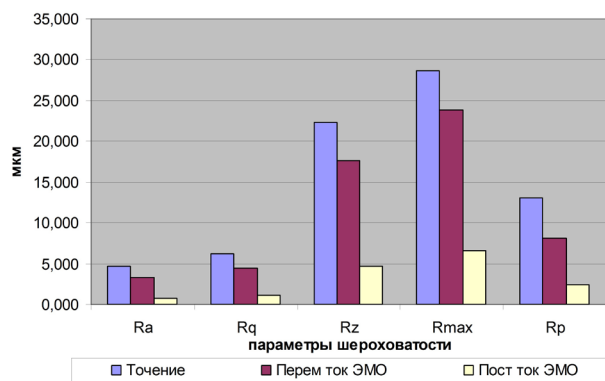


Рис. 6. Параметры шероховатости образцов

Экспериментальное исследование влияния условий проведения ЭМО покрытий различными токами происходило с использованием метода полных факторных экспериментов с тремя повторениями эксперимента в каждом опыте и последующей обработкой результатов эксперимента методами дисперсионного и множественного регрессионного анализа.

В результате выполненного анализа в качестве основных входных факторов при постоянном и переменном токе ЭМО покрытий были выбраны: плотность тока $j_A - X1$ (кА/мм²); давление ролика $q - X2$ (МПа); скорость вращения заготовки $v - X3$ (м/мин). Выходными факторами при проведении эксперимента при постоянном и переменном токе ЭМО нитрид-титановых покрытий являлись: параметр шероховатости поверхности Ra , мкм; параметр,

характеризующий качество поверхностного слоя C_x ; интенсивность изнашивания I_h .

В результате обработки данных и выявления влияния всех рассматриваемых факторов на параметры среднего арифметического отклонения профиля шероховатости Ra , комплексный параметр качества поверхностного слоя C_x и интенсивность изнашивания I_h были определены коэффициенты уравнения, и получены зависимости для их определения при обработке постоянным током:

$$Ra = 31,82 \cdot j_A^{1,783} \cdot q^{-0,371} \cdot v^{-0,446} \quad (1)$$

$$C_x = 0,299 \cdot j_A^{0,514} \cdot q^{-0,139} \cdot v^{-0,213} \quad (2)$$

$$I_h = 5,932 \cdot 10^{-10} \cdot j_A^{1,504} \cdot q^{0,453} \cdot v^{-1,154} \quad (3)$$

При обработке переменным током после определения коэффициентов уравнения, проверки на адекватность по критерию Фишера имеем следующие зависимости:

$$Ra = 6,806 \cdot j_A^{0,49} \cdot q^{-0,19} \cdot v^{-0,647} \quad (4)$$

$$C_x = 0,796 \cdot j_A^{0,476} \cdot q^{-0,189} \cdot v^{-0,563} \quad (5)$$

$$I_h = 7,622 \cdot 10^{-10} \cdot j_A^{1,329} \cdot q^{0,436} \cdot v^{-1,232} \quad (6)$$

Наибольшее влияние на все выходные параметры оказывают скорость вращения заготовки и плотность тока, однако, не следует отбрасывать и влияние давления инструмента.

При электрохимической обработке с по-

стоянным током нитрид-титановых покрытий кинетическая модель изнашивания, рассмотренная в статьях [5, 6], принимает вид $I_h = 4,43 \cdot 10^{-7} C_x^{2,99} C_F^{0,36}$ с тесной корреляционной зависимостью между выходным параметром I_h и параметрами C_x и C_F . Множественный коэффициент корреляции $R = 0,81$. При ЭМО с переменным током нитрид-титановых покрытий модель принимает вид $I_h = 1,29 \cdot 10^{-8} C_x^{1,39} C_F^{0,68}$. Множественный коэффициент корреляции $R = 0,83$.

Для сравнения триботехнических свойств предложенной технологии с другими распространенными методами обработки проведены исследования износостойкости и коэффициента трения для точения образцов из стали 45, в том числе с объемной закалкой; для круглого шлифования после закалки; алмазного выглаживания синтетическим алмазом марки АСПК-3; обкатывания роликом из жаропрочной стали; электрохимической обработки после точения; нанесения покрытий без обработки и с последующей финишной антифрикционной безабразивной обработкой (ФАБО) и ППД алмазом. Результаты полученных измерений коэффициентов трения и суммарного износа пар трения приведены на рис. 7, 8. Последующая обработка результатов также позволила определить коэффициенты в кинетической модели изнашивания для рассмотренных методов обработки и создать программу для автоматического расчета изнашивания трущихся сопряжений.

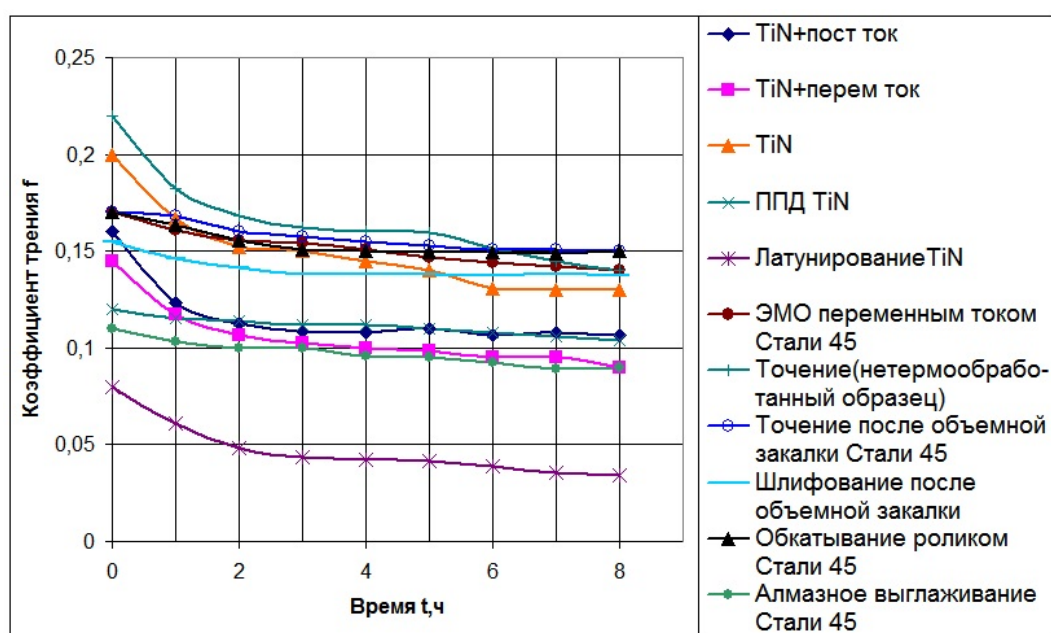


Рис. 7. Зависимости коэффициента трения скольжения от времени испытаний

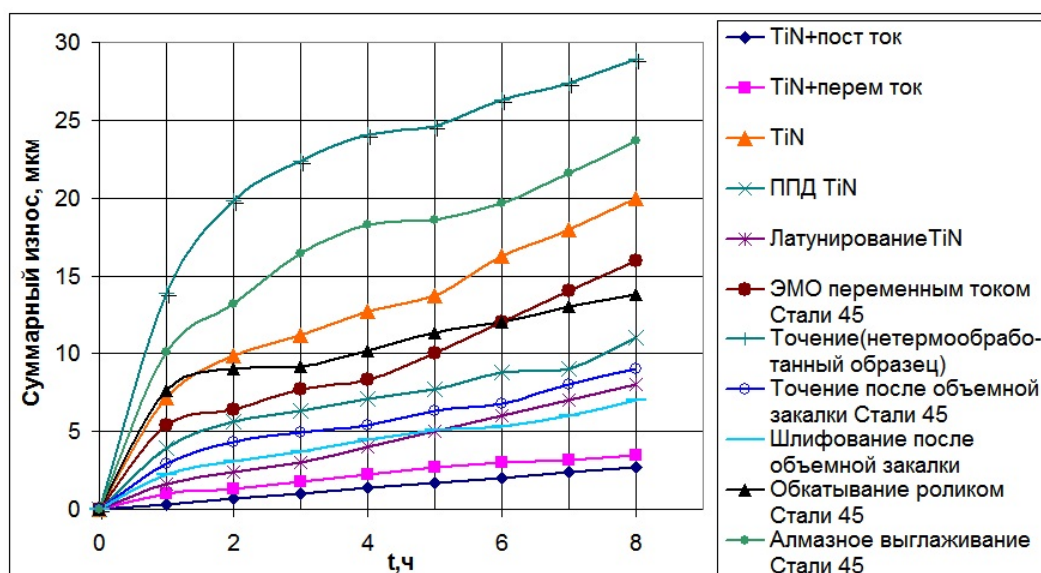


Рис. 8. Зависимости суммарного износа от времени испытаний

Анализ полученных результатов сравнительных испытаний показывает, что предложенная технология улучшения антифрикционных свойств покрытий ЭМО с постоянным и переменным токами позволяет обеспечить высокую износостойкость цилиндрических поверхностей трения, но более предпочтительной является обработка постоянным током.

Такое повышение износостойкости объясняется как улучшением триботехнических свойств, так и повышением твердости подложки. В результате ЭМО происходит существенное увеличение микротвердости основы на величину до 800...1200 HV с глубиной, достигающей до 1,0...2,0 мм и, благодаря этому сглаживаются механические свойства в промежуточной зоне между нитрид-титановым покрытием и основным материалом детали. Применение ЭМО позволяет обеспечить параметр Ra до 0,3 мкм устранением самых негативных дефектов покрытий. При этом изменяется микропрофиль поверхности, за счет увеличения радиусов закругления микрошероховатостей, изменяется в лучшую сторону опорная поверхность трения и улучшается несущая способность поверхности профиля, что приводит к дополнительному уменьшению контактных давлений сопряжения. Особенно ценно, что это сочетание технологических методов позволяет получить высокий результат по повышению износостойкости поверхностей трения деталей, изготовленных из обычных углеродистых сталей, что невозможно для других высокоэнергетических методов обработки, которые требуют значительно более высоколегированных и дорогих материалов

[2, 6].

Для реализации разработанной технологии на конкретном изделии (подшипников электростартера мод. СТ230Е) были проведены дополнительные исследования и стендовые испытания на контрольно-диагностическом стенде мод. Э-240 для пар трения с различными технологическими методами обработки поверхностей пары трения «вал – втулка» (рис. 9):

1) вал из стали 45 с твердостью 211 НВ – втулка из бронзографита (базовый вариант, применяемый в серийном производстве);

2) вал из стали 45 с напылением нитрид-титанового (TiN) покрытия – втулка из стали 45 с закалкой до твердости 45 HRC. При нанесении покрытия использовались следующие основные параметры режима: очистка ионами аргона при напряжении 800 В; активация и создание подложки ионами титана в течение 3-х минут при напряжении 500 В; напыление TiN-покрытия с оптимальными для данной пары трения параметрами: давлении азота 350 МПа; током дуги 125 А; до образования покрытия в 4,0...5,0 мкм.

3) вал из стали 45 с напылением нитрид-титанового покрытия и последующей электромеханической обработкой – втулка из стали 45 с закалкой до твердости 45 HRC. Для этого варианта технологии ЭМО производилось со следующими режимами: $U = 1,4$ В; $j_A = 0,7...0,8$ кА/мм²; $P = 100$ Н; $v = 2$ м/мин; $S = 0,61$ мм/об.

Стендовые испытания проводились с использованием цикловых нагрузок с переходом от режима максимальной мощности до

режима полного торможения и соответственно минимальной мощности P_{\min} и максимальном крутящем моменте M_{\max} . Режимы испытаний приняты следующие: давление на подшипник стартера – 2,04 МПа; сила тока $I = 500$ А; мощность – 1520 Вт; число оборотов $n = 3500^{-1}$; тормозной момент – 22 Н·м. Нагрузки циклично повторялись и, через равное количество циклов стартер разбирался, а втулки его подшипников обмерялись в трех сечениях по длине образующих индикаторным нутромером с ценой деления 0,001 мм с тремя повторениями каждого эксперимента.



Рис. 9. Стенд мод. «Э-240» для натуральных испытаний

Сравнение результатов при натуральных испытаниях стартера показало, что напыление нитрид-титановых покрытий без последующей обработки не дает практически никаких преимуществ перед базовым вариантом, но при последующей дополнительной электро-механической обработке покрытий их интенсивность изнашивания снижается в 2 – 3 раза [2].

Благодаря повышению эксплуатационных и триботехнических свойств, напыление нитрид-титановых покрытий с последующей электро-механической обработкой рекомендуется применять для широкого спектра деталей машин, которые подвергаются тяжелым нагрузкам в условиях граничного трения и большого изнашивания в процессе эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондаренко, В.А., Богодухов, С.И. Обеспечение качества и улучшение характеристик режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 2000. – 144 с.
2. Матлахов, В.П. Повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения на основе сочетания методов нанесения нитрид-титановых покрытий и элект-

ромеханической обработки // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2008. – №2. – С. 32 – 38.

3. Горленко, А.О., Матлахов, В.П., Прудников, М.И. Метод и автоматизированная установка для испытаний износостойкости цилиндрических поверхностей трения после различных технологических методов обработки // Гидродинамическая теория смазки – 120 лет: Труды международного научного симпозиума. В 2-х томах. Т.2. Орел: ОрелГТУ, 2006 – 693с.

4. Матлахов, В.П., Зависимость физико-механических свойств нитрид-титановых покрытий от давления азота // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – №2(10). – С. 93 – 96.

5. Горленко, А.О., Матлахов, В.П. Моделирование контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – №8. – С. 3 – 8.

6. Горленко, А.О., Матлахов, В.П. Обеспечение износостойкости поверхностей трения путем управляемого технологического воздействия // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2007. – №2(14). – С. 10 – 15.

REFERENCES

1. Bondarenko, V.A., Bogodukhov, S.I. *Quality Support and Cutter Properties Improvement*. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 144.
2. Matlakhov, V.P. Wear-resistance increase in cylindrical friction surfaces based on combination of nitride-titanium coating application methods and electro-machining // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2008. – No.2. – pp. 32-38.
3. Gorlenko, A.O., Matlakhov, V.P., Prudnikov, M.I. Method and automated plant for wear-resistance tests of cylindrical friction surfaces after different technological methods of working // *Hydro-dynamic theory of Lubrication – 120 Years: Proceedings of the Inter. Symposium*. In two volumes. Vol. 2. Orel: OrelSTU, 2006 – pp. 693.
4. Matlakhov, V.P., Dependence of nitride-titanium coating physical-mechanical properties upon nitrogen pressure // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2006. – No. 2(10). – pp. 93-96.
5. Gorlenko, A.O., Matlakhov, V.P. Contact interaction and wear simulation of cylindrical friction surfaces // *Friction and Lubrication in Machinery and Mechanisms*. – 2007. – No.8. – pp. 3-8.
6. Gorlenko, A.O., Matlakhov, V.P. Wear-resistance support in friction surfaces through controlled technological impact // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2007. – No. 2(14). – pp. 10-15.

Рецензент д.т.н.
Александр Олегович Горленко