

УДК 621.906

А. П. Моргаленко, Т. А. Моргаленко

Брянский государственный технический университет, Россия

Тел./Факс: (483-2) 588220; E-mail: margokru@mail.ru**ИНЖЕНЕРИНГ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
НА ОСНОВЕ ИХ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ**

В работе показано, что комбинированная обработка является эффективным средством повышения триботехнических характеристик соединений. А также отмечено, что существует принципиальная возможность реализации форсированной приработки как заключительной части технологического процесса изготовления пар трения скольжения; для научно-практической разработки этого метода следует применять теорию подобия, физическое и математическое моделирование. При этом установлено, что технологическое влияние на триботехнические характеристики происходит в процессе естественного старения, претерпевая некоторые изменения, физическая и количественная сущность которых подлежит детальному исследованию.

Ключевые слова: триботехнические процессы, алмазное выглаживание, покрытия, триботехнические характеристики.

A. P. Morgalenko, T. A. Morgalenko**ENGINEERING OF FRICTION SURFACES OF MACHINE PARTS ON THE BASIS OF THEIR
COMBINED TREATMENT**

The article describes the process of technological maintenance of tribotechnical properties of the surfaces of machine parts by means of a combined four-stage machining. The program research method and the concept of computer monitoring based on experiments with objects of research.

Keywords: tribotechnical properties, diamond smoothing, ion spraying, coating, discretization, dynamic loading, friction, attrition.

Технологическое обеспечение триботехнических свойств поверхностей деталей машин имеет большое значение, так как износостойкость соединений до 80% определяет активную часть жизненного цикла многих изделий машиностроения. Известно [1], что триботехнические свойства поверхностей во многом определяются параметрами качества поверхностного слоя (ПКПС), которые формируются в процессе обработки и характеризуются достаточной управляемостью за счёт факторов, соответствующих технологических систем (ТС). Эффективное управление параметрами ПКПС возможно при использовании методов поверхностного пластического деформирования программным способом (ППДПС); нанесения композиционных покрытий и мягких прирабочных пленок; финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО); лазерного легирования; методов ионной имплантации и других способов повышения износостойкости за счёт комбинированного применения высоких и современных технологий воздействия на поверхностный слой. Характерно, что большинство из перечисленных ТС достаточно хорошо адаптируются к условиям ремонта и восстановления деталей. Большое количество технологических факторов как компонент управления и факторов эксплуатации трибосистем обуславливает невозможность решения задач трибодиагностики и трибоинформатики на современном уровне без реализации средств компьютерного мониторинга. Они должны охватывать комплекс вопросов от диагностики ПКПС до регистрации триботехнических свойств с установлением соответствующих количественных зависимостей между ними путём построения разного рода моделей и определением надёжности технологического обеспечения параметров износостойкости в установленных допустимых пределах их варьирования.

В связи с этим, предлагается программный метод исследований технологического обеспечения ПКПС, определяющий триботехнические свойства поверхностей (ТСП), и непосредственных значений параметров ТСП. В основу метода положен программный метод испытаний металлорежущих станков, разработанный проф. А.С. Прониковым [2].

Предлагаемая концепция компьютерного мониторинга ПКПС и ТСП базируется на проведении экспериментов с объектами исследований, которыми являются ТС обработки, серийно выпускаемые и исследовательские приборы контроля ПКПС, программируемые испытательные стенды трибосистем.

Исследовалась износостойкость при трении-скольжении со смазкой цилиндрических поверхностей образцов из стали 45 ($HRC_3 = 48...50$) после комбинированной четырехступенчатой обработки: 1) чистовое точение или шлифование; 2) алмазное выглаживание; 3) нанесение твердого покрытия (нитриды титана или молибдена) методом ионного напыления в вакууме; 4) алмазное выглаживание поверхности покрытия (рис. 1).

На этапах 1 и 2 формировались параметры поверхности, обеспечивающие высокое качество покрытия на этапе 3. Этап 4 имеет целью формирование геометрических характеристик поверхности покрытия, исключающих процесс микрорезания поверхности бронзового контртела.

Экспериментальные исследования триботехнических характеристик моделей подшипников скольжения номинальным диаметром 50 мм проводились на специальном стенде, который позволяет изменять скорость относительного скольжения трибоэлементов, номинальную величину нормальной нагрузки $Q_{ном}$ на модель, дозированный подвод смазки в зону трения и регистрировать результаты испытаний. Специальное устройство позволяет осуществлять динамическое нагружение по закону:

$$Q = Q_{ном}(a + b \cdot \sin \omega),$$

где a, b – коэффициенты, позволяющие изменять нагрузку Q по заданному гармоническому закону ($0 \leq a \leq 1, 0 \leq b \leq 1$). Величина износа поверхностей измерялась методом естественных баз путем профилографирования и круглограммографирования на специальном комплексе, включающем в состав ПЭВМ.

В состав технического обеспечения измерительно-информационной системы (ИИС), разработанной для контроля параметров шероховатости, волнистости и отклонений от круглости (рис. 2) включены измерительные и вычислительные модули, а также модуль сопряжения. Функционирование ИИС обеспечивается соответствующим математическим и программным обеспечением.

В основе работы системы лежит обработка дискретизированного сигнала, несущего информацию об исследуемом профиле. Шаг дискретизации выбирается из условия её сохранения. Запись информации в память ЭВМ производится один раз на задаваемой длине, после чего могут быть рассчитаны интересующие параметры для любого участка профилограммы или круглограммы.

Система позволяет измерять как стандартизованные, так и исследовательские характеристики шероховатости, а также проводить корреляционный и спектральный анализ исследуемых профилей поверхности.

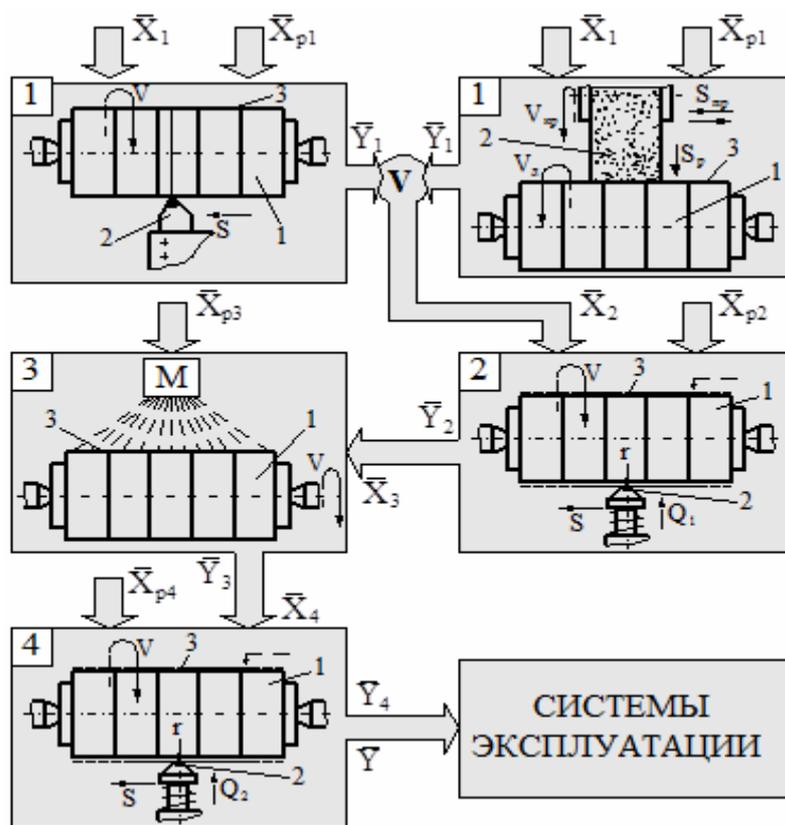


Рисунок 1. Этапы комбинированной четырехступенчатой обработки.

Наряду с другими параметрами исследовались величины начального износа [мкм] вала (h_{01}) и вкладыша (h_{02}), а также коэффициенты трения в начале (f_1) и конце (f_2) приработки. Для них получены имитационные модели вида:

$$Y_i = b_0 K_1 K_2 Q_1^{b_2} Q_2^{b_4} F^{b_6} V^{b_7} .$$

Здесь: K_1, K_2 – учитывают влияние метода предварительной обработки и материала твердого покрытия соответственно; Q_1, Q_2 – силы алмазного выглаживания на 2-ой и 4-ой ступенях обработки; F, V – погонная нагрузка на соединение и скорость относительного движения трибоэлементов. Величины Q_1, Q_2, F, V – детерминированные, остальные – случайные, имеющие нормальный закон распределения.

В качестве показателя надежности обеспечения исследуемых параметров рассматривалась вероятность попадания величины Y_i в заданный интервал: $P(Y_i \in (Y_i - \delta \bar{Y}_i; Y_i + \delta \bar{Y}_i))$. Здесь \bar{Y}_i – математическое ожидание 1-го параметра износоустойчивости; δ – его допустимое относительное отклонение от \bar{Y}_i ($0 \leq \delta \leq 1$). Эти две величины должны регламентироваться конструктором.

Надежность технологического обеспечения исследуемых параметров в симметричном δ -интервале определялась путем статистической обработки результатов машинных экспериментов (МЭ) над имитационными моделями (ИМ), проведенных по схеме Монте-Карло с использованием специальной методики.

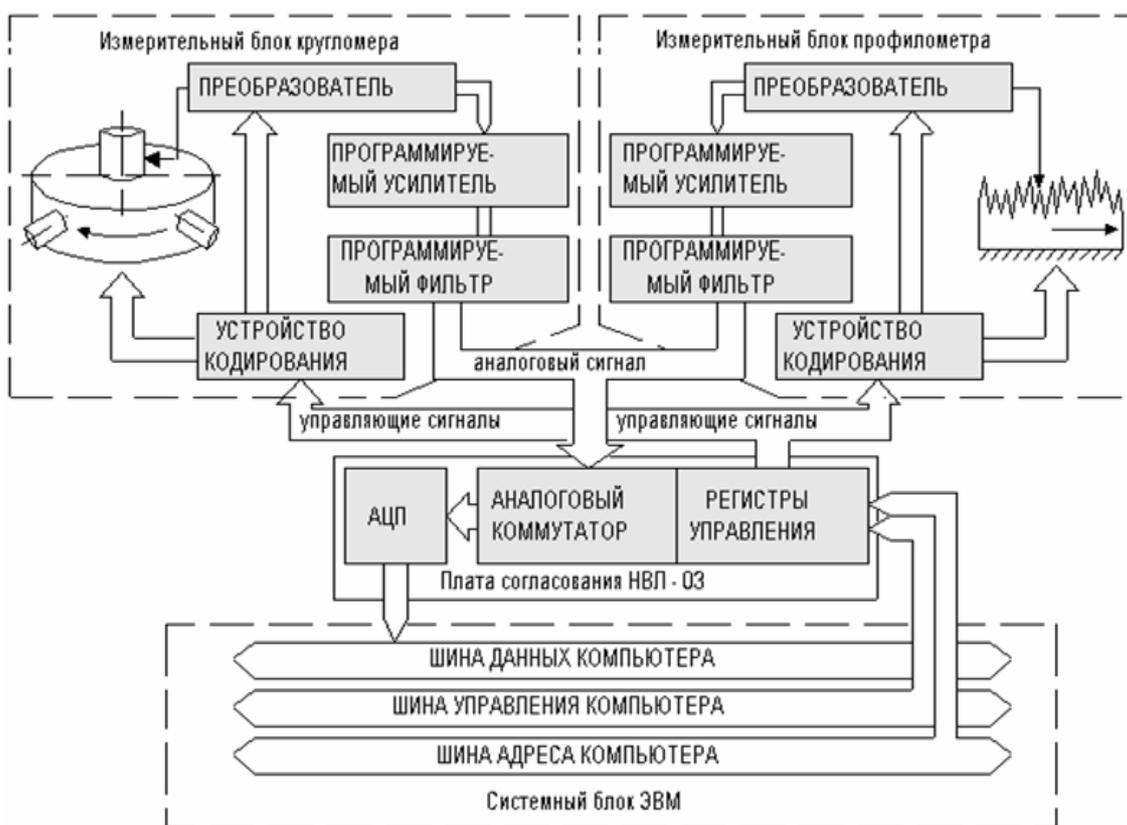


Рисунок 2. Структурная схема измерительно-информационной системы

Случайный характер параметров качества обуславливает различную неопределённость регламентирующих систем, которая может быть оценена информационной энтропией, которая для простой однопараметрической дискретной системы составляет величину:

$$H(Y) = -\sum_{i=1}^n P_i \log P_i ,$$

где P_i – вероятности возможных n состояний системы Y_1, Y_2, \dots, Y_n . Логарифм берётся по основанию 2.

Необходимость технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин требует использования сложных систем показателей качества их поверхностей. При этом элементы таких систем, т. е. параметры качества Y_1, Y_2, \dots, Y_s , должны быть независимы, так как введение в систему зависимых параметров не имеет смысла. Энтропия такой системы определяется [2]:

$$H(\overrightarrow{Y_1, Y_s}) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s P_{ij} \log P_{ij} = \sum_{k=1}^s H(Y_k) .$$

Учитывая вышеизложенное, можно предложить критерий рационального выбора системы показателей качества поверхности, который для простой (однопараметрической) системы имеет форму (1), а для сложной (многопараметрической) – форму (2):

$$\begin{cases} H(Y) = -\sum_{i=1}^3 P_i \log P_i = \min, \\ P(Y \in (\bar{Y} \pm \delta \bar{Y})) = \max \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} H(\overrightarrow{Y_1, Y_s}) = \sum_{k=1}^s H(Y_k) = \min, \\ P(Y_k \in (\bar{Y}_k \pm \delta \bar{Y}_k)) = \max \end{cases} \quad (2)$$

Минимум энтропии свидетельствует о приближении к максимальной идентификации качества поверхности данной системой показателей.

Величины $P(Y_k \in (\bar{Y}_k \pm \delta \bar{Y}_k)) = \max$ характеризуют максимальную надёжность ТС по обеспечению k -го параметра качества в заданном интервале. Это обеспечивается соответствующим выбором ТС и условий обработки поверхности.

Для рассматриваемых триботехнических характеристик исследовалось влияние следующих факторов, характеризующих материалы, технологию обработки функциональных поверхностей трибоэлементов и условия процесса приработки: X_1 – метод предварительной обработки поверхности вала (точение эльбором, круглое шлифование); X_2 – сила последующего алмазного выглаживания ($Q_1 = 100...400$ Н); X_3 – материал покрытия (Ti_2N, MoN), наносимого методом КИБ; X_4 – сила алмазного выглаживания покрытия ($Q_2 = 50...150$ Н); X_5 – мягкое покрытие вкладыша (медь, серебро, олово-висмут, кадмий); X_6 – величина погонной нагрузки в процессе приработки ($Q = 40...60$ Н/мм); V – скорость относительного скольжения поверхностей ($V = 25...40$ м/мин). Эксперимент проводился по плану в виде дробной реплики типа 2^{7-3} . Приработка осуществлялась при статическом приложении нагрузки со смазкой ИС-20.

Анализ результатов, приведенных на рис. 3, показывает, что для значений факторов, обеспечивающих минимальные величины h_{01}, h_{02}, f_1, f_2 , надёжность обеспечения минимальна при постоянном δ для параметра h_{01} и максимальна – для h_{02} (следует учитывать, что $h_{01} \ll h_{02}$). Величины f_1 и f_2 технологически обеспечиваются с одинаковой надёжностью.

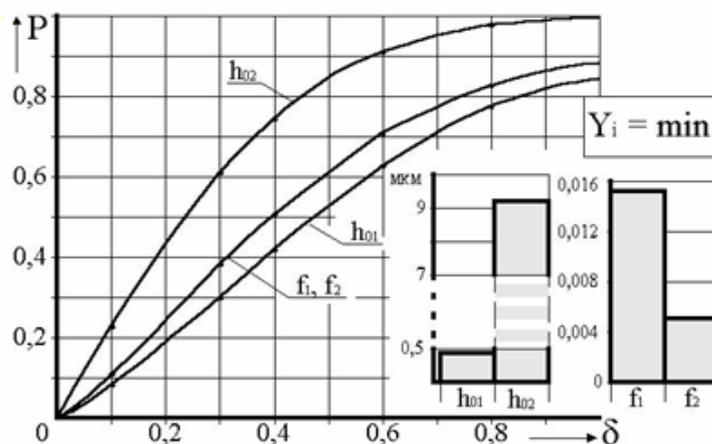


Рисунок 3. Результаты эксперимента.

По завершению данного процесса, с целью выявления влияния временного фактора на эволюцию триботехнических характеристик и их технологическую управле-

мость, трибоэлементы подверглись естественному старению в климатических условиях Брянского региона при наличии легкого слоя смазки и отсутствии воздействия влаги. Длительность данного процесса составила 8,76 x 10 часов.

Дальнейшие экспериментальные исследования проводились на модернизированном испытательном стенде, основной функциональный узел которого остался неизменным, и использовался идентичный комплекс контрольно-измерительной аппаратуры для осциллографирования протекающих процессов. К семи факторам жизненного цикла, предшествовавшего естественному старению, добавились: X_8 – величина пульсации нагрузки Q при изнашивании ($\Delta Q = \pm(0,15...0,25)Q$); X_9 – смазка в зоне контакта («ИС-20», «МГ-10»). Таким образом, испытания проводились в динамическом режиме и исходная матрица планирования трансформировалась в дробную реплику типа 2^{9-5} .

Сравнение величины коэффициентов трения со значениями f_2 , полученными в конце начального цикла, показало их некоторое увеличение (до 50%). Это вызывает необходимость дополнительной приработки после процесса старения, которая осуществлялась на форсированных режимах: при увеличении Q и V до 100%. По достижении в процессе форсированной приработки режима трения с коэффициентом $\approx f_2$ осуществляется переход к условиям динамического нагружения.

Анализ результатов показал, что проявление влияния технологических факторов на исследуемые параметры несколько ослабло. Это может косвенно указывать на существование самореорганизации поверхностного слоя в результате релаксационных процессов изменения физико-механических свойств за время старения. Исследовалась также грузоподъёмность соединений при ступенчатом возрастании нагрузки. Выявлено её высокое значение и сохранение значительного воздействия на неё технологических факторов.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) комбинированная обработка является эффективным средством повышения триботехнических характеристик соединений; 2) существует принципиальная возможность реализации форсированной приработки как заключительной части технологического процесса изготовления пар трения скольжения; для научно-практической разработки этого метода следует применять теорию подобия, физическое и математическое моделирование; 3) технологическое влияние на триботехнические характеристики проникает сквозь процесс естественного старения, претерпевая некоторые изменения, физическая и количественная сущность которых подлежит детальному исследованию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суслов, А. Г. Качество машин: Справочник в 2-х т. / А. Г. Суслов, Ю. В. Гуляев, А. М. Дальский и др. – М.: Машиностроение, 1995.
2. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, гл. ред. физ-мат. лит., 1969. – 576 с.
3. Фёдоров, В. П. Проблемы исследования и повышения надёжности технологического обеспечения качества деталей машин. / В. П. Федоров // Трение и износ. – 1997. – том 18. – № 3. – с. 349 – 360.
4. Фёдоров, В. П. Надёжность технологического управления качеством поверхностей деталей машин. / В. П. Федоров // Технологическое управление качеством деталей: Сб. науч. трудов – Киев: АТМ Украины, 1988. – С. 114 -123.

Поступила в редколлегию 07.06.2017 г.