

УДК 621.9

DOI:10.30987/2223-4608-2020-2020-1-15-24

В.П. Федоров, д.т.н., **А.Г. Суслов**, д.т.н., **М.Н. Нагоркин**, к.т.н.
(ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)
E-mail: naukatm@yandex.ru, nagorkin_mn@mail.ru

Диагностика технологических систем по надежности обеспечения заданных параметров качества обрабатываемых поверхностей деталей

Рассмотрена методика оценки параметрической надежности технологических систем механической обработки деталей машин по результатам диагностики по параметрам качества и эксплуатационных свойств (износостойкость, контактная жесткость) поверхностей. Представлены блок-схемы проведения диагностики технологических систем и последовательность проведения этапов диагностики, а также примеры их реализации.

Ключевые слова: технологическая система; поверхность; качество; диагностика; эксперимент; параметрическая надежность; вероятность; адекватность; шероховатость; моделирование.

V.P. Fyodorov, Dr. Sc. Tech., **A.G. Syslov**, Dr. Sc. Tech., **M.N. Nagorkin**, Can. Sc. Tech.
(FSBEI HE Bryansk State Technical University, 7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk 241035)

Technological system diagnostics on reliability of specified quality parameter assurance for parts surfaces under machining

In the paper there is shown a methodology for the parameter reliability diagnostics of the technological systems of machinery functional surface machining on their quality parameters. The problems arisen before designers and technologists and methods for their solution are under consideration. There are recommended roughness parameters affecting considerably the formation of a number of operation properties of surfaces. The circuits for the definition of technological system parameter reliability and a complex approach to experimental researches in the course of diagnostics are considered. The recommendations for the formation of standard computer modules of diagnostic systems and examples of their use are given.

Keywords: technological system; surface; quality; diagnostics; experiment; parameter reliability; probability; adequacy; roughness; modeling.

Качество поверхности детали – понятие комплексное. В настоящее время, наряду с традиционными показателями (геометрические параметры, физико-механические свойства, структура поверхностного слоя и др.) оно включает параметры эксплуатационных свойств (ПЭС), которые определяются назначением обрабатываемой функциональной поверхности детали. Это могут быть параметры износостойкости, контактной жёсткости, усталостной прочности и др.

В работе [1] определены параметры качества поверхностного слоя деталей, влияющих на их эксплуатационные свойства: Ra , Rz , $Rmax$, Sm , S , tp , Rp , v , b , ρ_m , Δ , $Wmax$, Smw , $Hmax$, H_p , $H_{\mu 0}$, h_H , $\sigma_{ост}$, h_{δ} , l_3 , ρD , c_{ϕ} , I , ϕ и др. Метрологически обеспеченными являются показатели: Rz , $Rmax$, Sm , tp , Rp , $Wmax$, Smw , $H_{\mu 0}$, h_H , $\sigma_{ост}$, l_3 , c_{ϕ} , I . Также определены технологически управляемые параметры качества: Ra , Rz , $Rmax$, Sm , Rp , Wz , $Wmax$, Smw , $Hmax$, $H_{\mu 0}$, h_H , $\sigma_{ост}$.

Результаты исследований [2] показывают, что, наряду с другими параметрами качества поверхности (ПКПС), геометрические (наиболее значимые из которых указаны в скобках), оказывают существенное влияние на различные показатели эксплуатационных свойств функциональных поверхностей деталей машин, таких, как: интенсивность износа поверхностей деталей в процессе нормального изнашивания (Ra , Wz , $Hmax$, Sm , tm), контактные деформации и контактная жёсткость (на величину пластических деформаций существенно влияют параметры Ra , Wz , $Hmax$, на упругие деформации – Sm , Ra), несущая способность профиля (безразмерный комплекс Крагельского-Комбалова ($Rmax$, Rp , ρ_m , v , b , tp)), величина накапливаемой контактной деформации (Ra , Wz , $Hmax$), коэффициент концентрации напряжений для поверхностей деталей, полученных методами механической обработки ($Rmax$, Rp , tp ($p = m$), Sm), комплексный параметр, характеризующий скорость коррозии

поверхностного слоя нетермообработанной детали после механообработки (R_{max} , R_p , tp ($p = m$), Sm) и др.

Для общего описания функциональной взаимосвязи параметров ТС можно ввести следующие обозначения: X_1 – группа входных факторов ТС, характеризующих условия обработки; Y_1 – группа выходных параметров ТС, включающая ПКПС; X_2 – группа факторов, определяющих условия эксплуатации обрабатываемой детали в соответствующей системе (нагрузка q , скорость скольжения V_1 и др.); Y_2 – группа выходных параметров ТС, определяющих ЭС детали.

Зависимости между факторами обработки, параметрами состояния поверхностного слоя, параметрами эксплуатационных свойств и условиями эксплуатации можно определить следующими соотношениями:

$$\bar{Y}_1 = F_1\{\bar{X}_1\}, \quad (1)$$

$$\bar{Y}_2 = F_2\{\bar{X}_2, \bar{Y}_1\}, \quad (2)$$

$$\bar{Y}_2 = F_3\{\bar{X}_1, \bar{X}_2\}. \quad (3)$$

Эти соотношения носят вероятностный характер, так как множество параметров групп носят случайный характер.

Соотношение (1) представляет собой функцию технологической системы (ТС) по обеспечению ПКПС, и оно должно быть положено в основу технологического проектирования при необходимости обеспечения лишь параметров данной группы. В этом случае по заданным элементам Y_{1i} определяют факторы обработки X_{1i} , удовлетворяющие условию (1), а затем оценивают показатели параметрической надёжности ТС по обеспечению параметров Y_{1i} .

Если заданы параметры Y_{2i} и условия эксплуатации X_{2i} , то возможны два случая. Первый заключается в том, что, используя соотношение (2), определяют необходимые значения Y_{1i} , а затем из соотношения (1) – условия обработки X_{1i} . Второй случай заключается в том, что из соотношения (3) по заданным элементам Y_{2i} и X_{2i} определяют условия обработки X_{1i} .

Как в первом, так и во втором случаях после определения условий обработки, удовлетворяющих поставленным требованиям, оцениваются показатели надёжности ТС по обеспечению параметров Y_{2i} . Результаты, полученные по второму, более короткому пути, могут обеспечить и более высокую надёжность, так как в этом случае исключается из промежуточных расчётов целый ряд случайных величин Y_{1i} .

Таким образом, во всех рассмотренных случаях необходимо знать соотношения (1) – (3), которые представляют собой модели фор-

мирования ПКПС и ПЭС в процессе обработки или функции технологических систем и их вероятностные характеристики.

Известно, что ПКПС являются случайными величинами в силу воздействия на обрабатываемую поверхность со стороны ТС большого числа случайных факторов [1, 2 и др.]. Это приводит к тому, что ПЭС поверхности детали, формируемой в процессе обработки, будут также случайными величинами, что нежелательно, но неизбежно, как неизбежны случайный характер формирующих их параметров шероховатости и условий эксплуатации. Этим определяется сложность задачи надёжного обеспечения требуемых ПЭС обрабатываемых поверхностей деталей машин, для решения которой необходима соответствующая конструкторско-технологическая подготовка производства, включающая несколько этапов, важнейшими из которых являются следующие задачи.

1. *Задача конструктора.* Конструктор должен назначить одну из групп параметров: а) ПКПС (один или несколько) обеспечивающие требуемые ПЭС функциональной поверхности с максимально допустимыми диапазонами варьирования; б) значения ПЭС также с допустимыми пределами их вариации. В каждом случае должна быть указана минимально допустимая вероятность P_{min} выполнения этих технических требований.

2. *Задача технолога.* Технолог должен выбрать ТС для чистовых и финишных операций, на которых, в основном, окончательно формируются показатели качества поверхности, с соответствующей параметрической надёжностью и назначить условия обработки, обеспечивающие требуемые параметры (ПКПС или ПЭС) обрабатываемой поверхности $Y_j(t)$ в допустимых интервалах с заданной или более высокой вероятностью выполнения заданий по обеспечению j -го параметра качества $P_j(t)$ (1):

$$P\{E_{ij} \leq Y_j(t) \leq E_{sj}\} = P_j(t) \geq [P_{min}]. \quad (4)$$

Если одновременно обеспечивается m параметров, то (4) принимает вид (5) (ГОСТ 27.202-83):

$$P\{E_{i1} \leq Y_1(t) \leq E_{s1}; E_{i2} \leq Y_2(t) \leq E_{s2}; \dots; E_{im} \leq Y_m(t) \leq E_{sm}\} = P(t), \quad (5)$$

где E_{ij} , E_{sj1} – соответственно нижнее и верхнее предельные отклонения для i -го параметра качества, установленные в конструкторско-технологической документации; $Y_j(t)$ – значения j -го параметра в момент времени t . При этом наработка T может измеряться в единицах времени, циклах функционирования или в единицах изготовленной продукции.

Одним из основных показателей надёжности технологического процесса является па-

раметрическая надёжность отдельных операций по регламентируемым показателям качества. Это особенно касается чистовых и финишных операций, так как они вносят значительный вклад в формирование качества обработанной поверхности. В соответствии с ГОСТ 27.203-83 параметрическая надёжность ТС представляет собой вероятность выполнения задания по регламентируемым показателям качества.

Из этого следует, что технологу необходимо знать параметрическую надёжность конкретных ТС, которые будут использованы в проектируемом технологическом процессе, но такие данные отсутствуют как в технической документации на оборудование, так и в справочной литературе за редкими исключениями. Это объясняется тем, что каждая ТС имеет свои особенности в плане формирования обрабатываемой поверхности и её ПКПС.

Эти особенности определяются не только технологической сущностью системы и происходящими в ней физическими процессами взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью, механизмом технологического наследования, но и физическим состоянием самой ТС, обусловленным временем и условиями её эксплуатации, качеством технического обслуживания, износом и другими факторами. В связи с этим рекомендации и статистические модели формирования ПКПС и ПЭС для тех или иных методов обработки, имеющиеся в научной и справочной литературе, могут оказаться неактуальными для рассматриваемой ТС и требовать уточнения. Это можно объяснить следующими причинами.

1. В подавляющем большинстве случаев в моделях формирования ПКПС и ПЭС в процессе обработки отсутствует фактор времени активной эксплуатации рассматриваемых ТС, что исключает возможность учёта влияния её текущего физического состояния на формируемые параметры качества поверхности и ставит под сомнение адекватность таких моделей в других временных интервалах и лишает возможность оценки вариации моделируемого параметра качества в процессе эксплуатации ТС.

2. Построение моделей формирования ПКПС и ПЭС проводится экспериментально на конкретном оборудовании, имеющем свои физические характеристики, а значит и свой «технологический почерк». В связи с этим распространение полученных моделей, а также применение графических и табличных рекомендаций для технолога на их основе для других аналогичных, но имеющих свои физические характеристики, ТС вызывает серьёзные сомнения.

3. В технической документации на металлорежущее оборудование отсутствуют данные о его параметрической надёжности по качеству обрабатываемых поверхностей. Это объясняется тем, что она зависит еще от ряда факторов: применяемый инструмент, оснастка, параметры заготовки и др., что в комплексе и составляет ТС.

Анализ этих причин показывает, что для успешного решения поставленной задачи обеспечения требуемых ПКПС или ПЭС обрабатываемой поверхности в допустимых интервалах с заданной или более высокой вероятностью выполнения заданий технологу требуется диагностика ТС по параметрической надёжности. При этом следует проводить:

1) приемную экспресс-диагностику ТС (приемная ЭДТС) для приобретаемого оборудования;

2) плановую экспресс-диагностику ТС (плановая ЭДТС) с установленным регламентом для конкретных условий эксплуатации, которая позволит учесть изменения физического состояния ТС за прошедший междиагностический период времени и уточнить её параметрическую надёжность.

В результате выясняется возможность дальнейшей эксплуатации ТС по обеспечению заданных ПКПС или ПЭС с вероятностью выполнения задания, равной или больше допустимой, соответствующей (4) или (5). Если эти условия не выполняются, то ТС использовать нельзя, так как она не обеспечит заданных ТУ на обработку. В этом случае требуется принятие организационных решений.

Примерная схема ЭДТС представлена на рис. 1. ЭДТС предполагает автоматизацию обработки поверхностей образцов в соответствии с заданным планом эксперимента (блоки А, В, рис. 1); измерение ПКПС (С1 и С2) и ПЭС (С3) с применением информационно-измерительных систем (блок С); процессом обработки и статистического анализа результатов диагностики (блок D). ЭДТС целесообразно осуществлять на основе реализации активного эксперимента, что позволяет получить физико-статистические модели формирования ПКПС и ПЭС в зависимости от условий обработки при наименьших затратах.

Диагностика ТС проводится на основе проведения активного эксперимента, что позволяет получить физико-статистические модели формирования ПКПС и ПЭС в зависимости от условий обработки. План проведения эксперимента формируется в блоке А (рис. 1). Оценка параметрической надёжности ТС осуществляется в блоке D и проводится на основе применения методов математической статистики и имитационного моделирования.

Таким образом, в схеме ЭДТС можно выделить два этапа: построение и анализ имитационных моделей для ТС и расчёт её параметрической надёжности.

онных моделей для ТС и расчёт её параметрической надёжности.

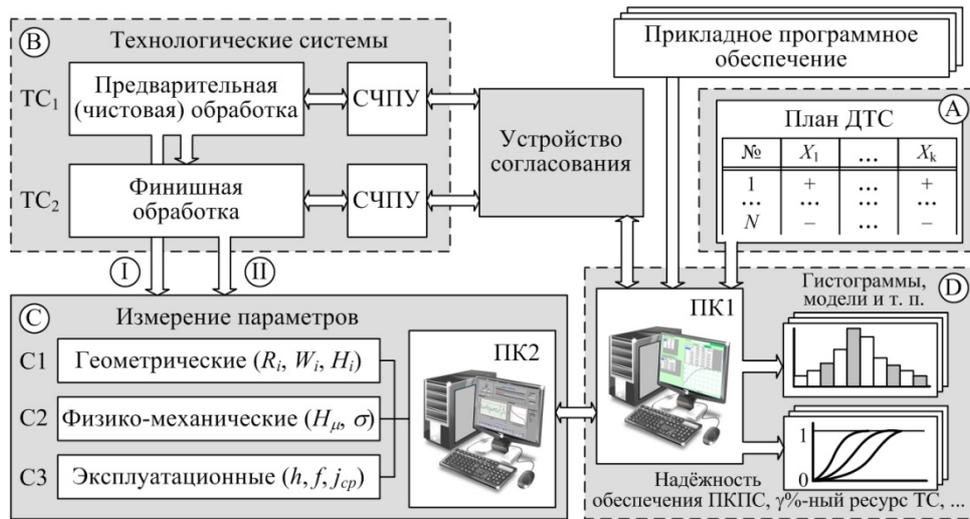


Рис. 1. Автоматизация ЭДТС программным методом:

А – блок планирования; В – блок обработки поверхностей деталей; С – блок измерения ПКПС и ПЭС; Д – блок обработки результатов ЭДТС

Анализ моделей ТС методом имитационного моделирования базируется на основе математико-статистического подхода к анализу сложных систем и предполагает использование метода статистических испытаний (Монте-Карло). Имитационное моделирование ТС включает планирование организации и выполнение на ЭВМ экспериментов с имитационными моделями, машинную обработку данных и анализ результатов. Для оценки надёжности ТС по обеспечению ПСПС или ПЭС обрабатываемых поверхностей деталей необходимо:

1) построить статистические модели функции ТС одним из методов, выбранным по результатам априорной информации и с достаточной для практических целей точностью можно представить, например, в виде полиномиальной (аддитивной) модели (6) или функции Кобба-Дугласа (мультипликативная модель) (7):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + \dots + \beta_k X_k, \quad (6)$$

$$Y_i = \beta_0 \cdot X_1^{\beta_1} \cdot X_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot X_k^{\beta_k}, \quad (7)$$

где Y_i – i -й ПКПС или ПЭС поверхности детали после обработки; X_i – i -й фактор технологического процесса; β_0, β_i – истинные значения коэффициентов регрессии, которые являются случайными нормально-распределёнными величинами и имеют математические ожидания $M\{\beta_0\} = b_0$ и $M\{\beta_i\} = b_i$ и среднеквадратические отклонения $S\{\beta_0\}, S\{\beta_i\}$ ($i = 1, \dots, k$); k – число факторов в модели;

2) используя соответствующие алгоритмы и программное обеспечение, реализовать машинные эксперименты (МЭ) в выбранной области факторного пространства по схеме Монте-Карло и проанализировать с целью

оценки вероятностных характеристик истинных значений коэффициентов регрессии (β_0, β_i), входящих в модели (6) и (7) выходных величин диагностируемой ТС.

3) спрогнозировать надёжность технологического обеспечения заданий конструктора по ПКПС или ПЭС поверхности детали в интервалах ($Y_{i \min}, Y_{i \max}$) при обработке в диагностируемой ТС и проверить выполнение условий (4) или (5).

Построение физико-статистических моделей наиболее эффективно проводить с применением известных методов корреляционно-регрессионного анализа и теории планирования эксперимента.

Для оценки вероятностных характеристик параметров моделей (6) и (7) нужно вычислить N значений функции Y_i в соответствии с законом распределения её параметров. Например, в случае нормального распределения $Y_i = f(X_1, X_2, \dots, X_k; b_0, b_1, \dots, b_k; S\{\beta_0\}, S\{\beta_1\}, \dots, S\{\beta_k\})$, эти значения вычисляются по формуле (8):

$$Y_i = b_0 \prod_{j=1}^k X_j^{RND N_i(b_i, S\{\beta_i\})}, \quad (8)$$

где X_j – значения j -го входного фактора обработки в ТС ($j = 1, \dots, k$); $RND N_i(b_i, S\{\beta_i\})$ – нормально распределённое случайное число.

Если в моделях (6) и (7) случайными величинами являются только коэффициенты β_0 и β_i , то с учётом свойств математического ожидания $M\{Y_{i0}\}$ и дисперсии $S^2\{Y_{i0}\}$ для определения их оценок можно использовать аналитические зависимости (9, 10) для моделей вида (6) или (11, 12) для моделей вида (7):

$$M\{Y_{i0}\} = M\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k X_i M\{\beta_i\}, \quad (9);$$

$$S^2\{Y_{i0}\} = S^2\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k X_i^2 S^2\{\beta_i\}; \quad (10)$$

$$M\{Y_{i0}\} = \exp(\ln M\{\beta_0\} + \sum_{i=1}^k \ln X_i \cdot M\{\beta_i\}), \quad (11)$$

$$S^2\{Y_{i0}\} = \exp(\ln(S^2\{\beta_0\}) + \sum_{i=1}^k (\ln X_i)^2 S^2\{\beta_i\}). \quad (12)$$

Если же в моделях (6) и (7) случайными являются один или несколько факторов обработки X_i , то для оценок $M\{Y_{i0}\}$ и $S^2\{Y_{i0}\}$ аналитические выражения найти не удастся. Их определение возможно только путем статисти-

ческой обработки массива данных Y_{iN} объёма N , полученных в результате машинного эксперимента над указанными моделями с параметрами, полученными в п.п. 1, 2 в исследуемой области факторного пространства.

Результаты расчетов по формулам (9) – (12) позволяют спрогнозировать параметрическую надёжность ТС и принять решение о возможности её дальнейшей активной эксплуатации. С этой целью определяется вероятность P выполнения задания конструктора по регламентируемым параметрам качества Y_i (параметрическая надёжность ТС) обрабатываемой поверхности в интервале $(Y_{i \min}, Y_{i \max})$ с использованием зависимостей (13) или (14):

$$P\{Y_{i \min} < Y_i < Y_{i \max}\} = \Phi\left(\frac{Y_{i \max} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right) - \Phi\left(\frac{Y_{i \min} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right), \quad (13)$$

$$P\{Y_i < Y_{i \max}\} = 0,5 + \Phi\left(\frac{Y_{i \max} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right). \quad (14)$$

Зависимость (13) используется в случае двухстороннего ограничения допуска на параметр Y_i , а (14) – в случае одностороннего ограничения допуска. Полученные результаты проверяются на соответствие условиям (4) или (5). Для решения этой задачи разработано специальное алгоритмическое и прикладное программное обеспечение.

В процессе диагностики ТС на этапе обработки поверхностей деталей варьируются значения управляющих технологических факторов обработки. Например, для ТС обработки плоских поверхностей деталей методами ППД после торцевого фрезерования композитом 10 могут изменяться как количественные показатели факторов (например, значения параметров шероховатости поверхности после фрезерования Ra_{np} ; силы Q ППД инструментом упругого действия; подачи S и скорости v обработки методом ППД и др.), так и качественные (АВ или накатывание шариковым индентором и др.).

В блоке В (рис. 1) в соответствии с планом ЭДТС в автоматизированном режиме выполняется обработка поверхности детали. На фрезерном станке с ЧПУ FQW-400 обработка детали торцевым фрезерованием композитом 10 должна обеспечить максимальные и минимальные значения параметров шероховатости на различных участках поверхности. Это обеспечивается программным способом за счёт дискретного изменения величины подачи $S_{фр}$ в пределах технологического перехода (рис. 2).

Дальнейшая обработка методами ППД инструментом упругого действия осуществляет-

ся с изменением значений силы Q ППД и подачи S . На рис. 3 представлена схема обработки поверхности образца путём программной реализации двух полуреплик плана полного факторного эксперимента (ПФЭ) для алмазного выглаживания (АСПК) и для накатывания шариком (сталь ШХ15).

На этапе измерения ПКПС и ПЭС поверхностей образцов (блок С, рис. 1) применяются компьютеризированные информационно-измерительные системы для оценки параметров качества обработанных поверхностей деталей.

Выбор метрологического обеспечения является важным фактором оценки параметрической надёжности ТС, так как его точность и надёжность определяют адекватность результатов ЭДТС в целом. К настоящему времени существенно расширилось применение специализированных компьютеризированных средств измерений, резко повышающих точность, надёжность и производительность измерений.

Если такие средства отсутствуют, то можно осуществить компьютеризацию морально устаревших, но физически работоспособных устройств, резко повысив при этом их возможности в плане увеличения количества измеряемых параметров. Анализ показывает, что измерительные каналы метрологических систем, как правило, включают индуктивные, тензометрические, температурные и др. датчики. Для их компьютеризации необходимо наличие устройств согласования измерительных модулей с ПК с целью обеспечения функций управления, измерения, сбора, передачи и обработки оперативной информации.

Устройства согласования целесообразно разрабатывать в виде аппаратно-программных средств (АПС), что обеспечивает возможность их применения в системах диагностики и измерений различной физической сущности. Примером может служить устройство АПС-1, построенное на базе платы сбора данных PCI-

1202L (Signal, г. Москва) и способное работать в различных компьютеризированных системах сбора и обработки информации (рис. 4) [4, 5, 6]. Канал усиления для тензодатчиков и термопары создан на базе инструментального усилителя AD8550. Реализована диагностика состояния датчиков во время работы.

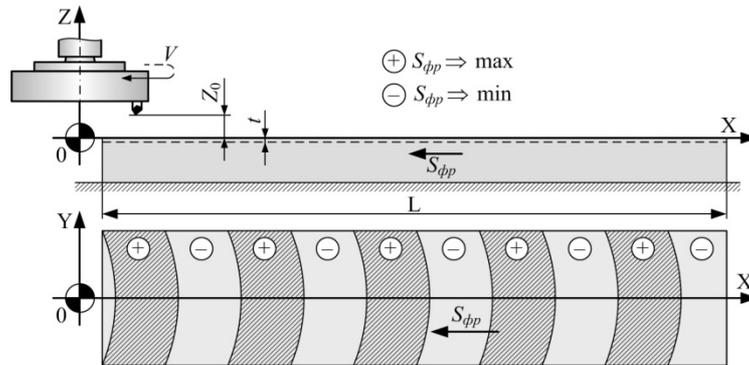


Рис. 2. Схема торцевого фрезерования композитом 10 плоской поверхности заготовки с дискретным изменением величины подачи $S_{фр}$ на станке с ЧПУ

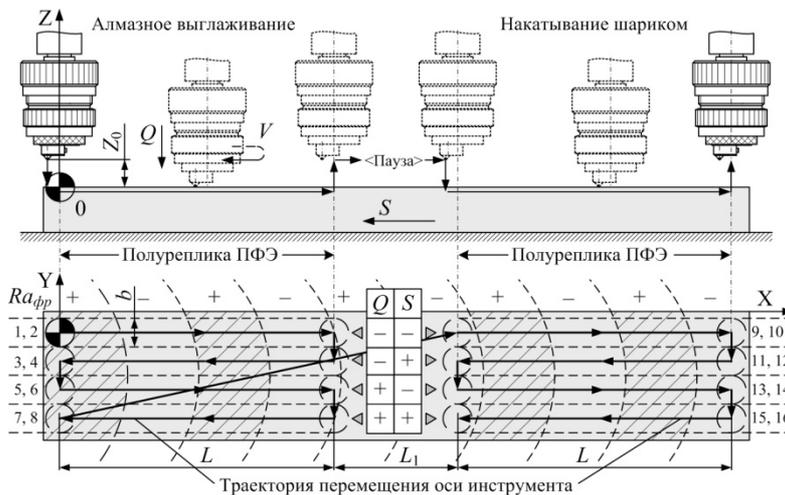


Рис. 3. Схема обработки плоской поверхности заготовки методами ПFD при реализации полуребрик плана ПФЭ в процессе ЭДТС на станке с ЧПУ

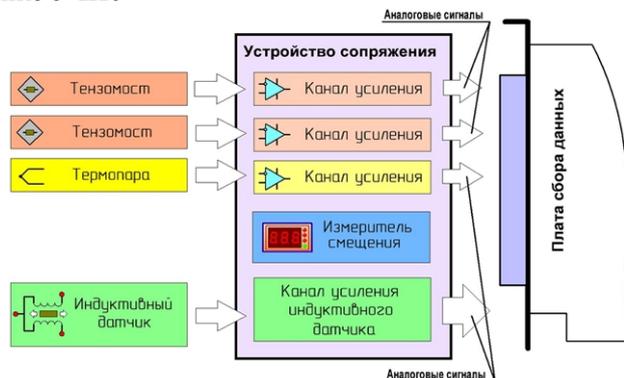


Рис. 4. Аппаратно-программный интерфейс АПС-1

Блоки АПС-2 и АПС-3 являются логическим продолжением аппаратно-программной идеологии, заложенной в блоке АПС-1, наследуют ряд его возможностей, но имеют и принципиальные отличия. Они позволяют

программным путем автономно управлять балансировкой и работой привода датчиков в соответствии с рекомендациями, оснащены мини-дисплеями, на которых в режиме диалога с оператором отображается информация о

настройках для работы, а в режиме работы отображается после усиления информация от датчиков, для хранения которой имеются 4 в АПИ-2 и 8 в АПИ-3 ячеек памяти, предусмотренные для случаев удалённой работы от ПК. Передача данных осуществляется через порт USB. Обработку результатов измерений осуществляет специальное программное обеспечение, применение которого, благодаря возможности оперативной коррекции его структуры, обеспечивает «гибкость» АПС, заключающейся в изменении и дополнении алгоритма расчета параметров качества на основе

полученной с датчиков измерения сигналов информации.

При компьютеризации профилографо-профилометров на основе АПС (рис. 5) система обеспечивает расчет свыше 15-ти параметров шероховатости (аналогично для волнистости), рассчитываются и строятся графики гистограмм распределения ординат профиля, относительной опорной длины шероховатости, её спектральные характеристики и автокорреляционные функции. Форму и содержание протокола расчёта результатов диагностики пользователь может формировать по своему усмотрению [4, 5, 6 и др.].

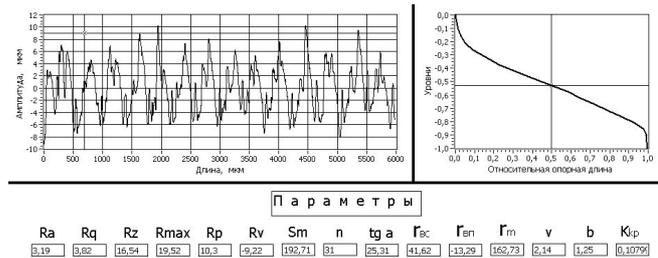
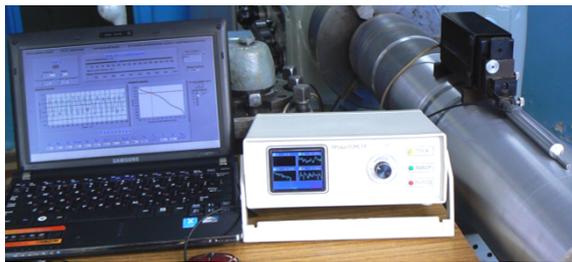


Рис. 5. Измерение шероховатости в рабочей зоне ТС под управлением АПС-2 и результаты измерений

Процесс измерения параметров эксплуатационных свойств поверхностей деталей (блок С, рис. 1), отличается следующими особенностями. Исследуемые ПЭС поверхности (износостойкость, контактная жёсткость и др.) определяются функциональным назначением детали в конкретном узле. Практически отсутствуют нормативно-технические документы для определения и регламентации показателей большинства параметров эксплуатационных свойств поверхностей деталей. Существуют указания рекомендательного характера, стандарты испытаний на надёжность, отдельные нормали (контактная жёсткость). Практически отсутствуют стандартизованные или нормализованные методы диагностики поверхностей по параметрам эксплуатационных свойств.

Поэтому необходима реализация и унификация систем программных испытаний ЭС поверхностей деталей непосредственно в зоне ТС её обработки, результаты которых можно применять для сравнительной оценки и ранжирования различных ТС формирования ПКПС по критериям обеспечения требуемых ПЭС.

С целью унификации испытательные стенды следует создавать по модульному принципу. Так, при диагностике износостойкости основными модулями являются модуль привода относительного скольжения поверхностей трибоэлементов, модуль нагрузки на соединение, измерительный модуль. Аналогичные модули используются при диагностике пара-

метрической надёжности ТС и по другим эксплуатационным свойствам. Это диктует целесообразность применения унифицированных приводов управления указанными модулями. С этой целью предлагается автоматизированный привод управления модулями, основу которого составляет силовой шаговый привод, шаговый двигатель и программируемый контроллер которого конструктивно могут составлять одно целое (например, сервопривод типа СПШ-10).

Сложной задачей при проведении диагностики ТС по параметрам ЭС является измерение, регистрация и статистическая обработка входных и выходных параметров процессов, протекающих при стендовых испытаниях.

Эффективной является реализация метрологического обеспечения процессов испытаний на базе компьютеризации специализированных стендов и измерительных приборов с датчиками различных типов, предназначенных для регистрации и преобразования первичной информации. В таком случае применяются устройства сопряжения датчиков с платой сбора данных в ПК, адаптированные к условиям измерений различных ПКПС и ЭС и передающие при достаточном усилении сигналы от датчиков с минимальными помехами и искажениями. На рис. 6 представлена структурная схема автоматизированной системы исследования износостойкости поверхностей деталей соединений трения скольжения, в которой применяются подобные устройства.

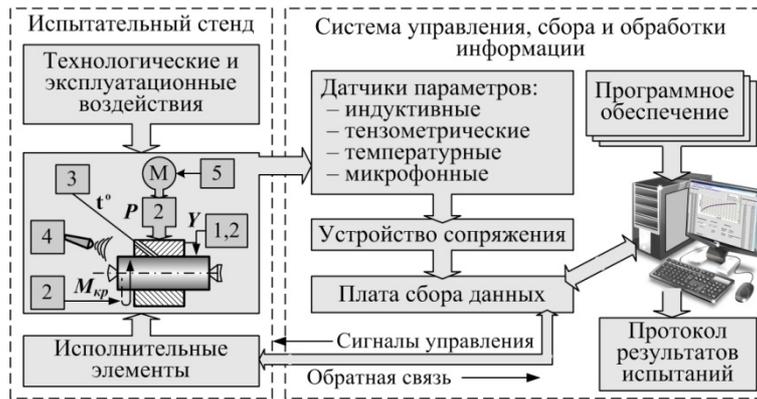


Рис. 6. Структура автоматизированной системы исследований ЭС поверхностей деталей соединений трения скольжения:

1, 2, 3, 4 – индуктивные, тензометрические, температурные и микрофонные датчики; 5 – исполнительные элементы приводов устройств моделирования эксплуатационных воздействий на поверхности трибоэлементов

Как показывает практика, во многих случаях диагностика ТС по параметрам эксплуатационных свойств поверхностей связана с необходимостью проведения стендовых испытаний соединений обработанных деталей, с имитацией условий и нагрузок, аналогичных реальным условиям эксплуатации соединений.

Основными модулями испытательных стендов при диагностике, например, износостойкости поверхностей деталей соединений трения скольжения, являются модуль привода относительного скольжения поверхностей трибоэлементов, модуль нагрузки на соединения и измерительный модуль. В этом случае при диагностике, например, износостойкости основными модулями являются: модуль привода относительного скольжения поверхностей трибоэлементов, модуль нагрузки на соединение, измерительный модуль.

Для испытаний соединений деталей по другим ПЭС применяются аналогичные модули. Таким образом, необходимо создание унифицированных приводов управления модулями создания эксплуатационных воздействий на поверхности деталей в испытательных стендах.

Для исследования структуры и микроанализа поверхности разработана система микроструктурного анализа [4, 5 и др.] на базе применения отечественных металлографических микроскопов: МИМ-10 и МЕТАМ РВ, МБС-2, ПМТ-3М и др., позволяющих регистрировать увеличенный фрагмент поверхности детали или образца, цифровой видео- и фотоаппаратурой с параллельной передачей данных на ПК. Система построена по модульному принципу и имеет открытое программное обеспечение. Изображение через оптическое согласующее устройство передаётся на цифровую фото- или видеокамеру, которая запоминает его и передаёт на ПК для детального исследования и анализа с помощью специального

программного обеспечения (например, Image Score). Видеокамера, наряду с дискретной, обеспечивает непрерывную регистрацию процесса с возможностью его фиксации в требуемые программируемые моменты времени. Это важно при исследовании кинетики процессов на поверхности в результате физических (склерометры и др.) и химических (нанесение плёнок, исследование коррозии и др.) воздействий.

Разработанное прикладное программное обеспечение для определения параметрической надёжности ТС, позволяет построить модели, характеризующие влияние входных факторов ТС на формирование исследуемых требуемых параметров качества поверхности детали, и методом имитационного моделирования определить вероятность выполнения задания ТС.

В рабочих окнах программы вводятся исходные данные результатов исследований ТС: число входных факторов X_i с границами факторного пространства; число измерений выходных параметров, произведенных во время эксперимента и их результаты. Далее рассчитываются коэффициенты регрессии моделей для выбранного вида модели – аддитивной или мультипликативной (определяется в меню выбора параметров расчётов) и проводится проверка их значимости по t -критерию Стьюдента, а также адекватности полученной модели по F -критерию Фишера с учетом заданных критериев значимости. Результаты расчётов появляются в соответствующих окнах программы или сохраняются по желанию пользователя в протоколе в виде *html*-отчётов.

Выбор функции «Имитационное моделирование» позволяет рассчитать вероятность выполнения задания технологической системой. Рассчитывается вероятность P_i появления значения Y_i в интервалах δ % с построением соответствующего графика. При этом пользова-

тель может задавать различные фиксированные значения входных факторов X_i – минимальные, максимальные, средние; или выходных факторов Y_i – минимальные или максимальные. Окончательные результаты расчёта

параметрической надёжности ТС, как вероятности выполнения ею задания (в данном примере в симметричном δ -%-ном интервале), представляются в окне результатов расчета (рис. 7).

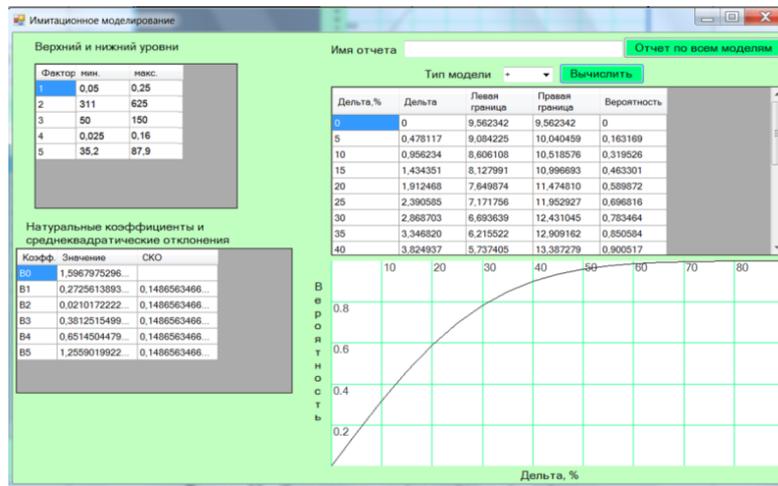


Рис. 7. Окно результатов расчёта вероятности выполнения задания технологической системой

В ходе диагностики ТС металлообработки выявляются диапазоны устойчивого технологического управления параметрами качества в каждой из них.

Так, при исследовании параметрической надёжности установлено, что различные параметры качества при одном и том же допустимом δ -%-ом отклонении от средней заданной величины обеспечиваются с различной надёжностью (рис. 8). Например, в ТС торцевого фрезерования композитом 10 с последующим алмазным выглаживанием (АВ) плоских поверхностей деталей из чугуна в интер-

вале $\pm 0,3\bar{R}_i$ для высотных параметров вероятность их обеспечения колеблется от 0,63 для R_p до 0,97 для R_z ; в ТС обработки цилиндрических поверхностей деталей из стали 45 точением композитом 10 с последующим АВ вероятность изменяется в пределах от 0,73 для R_p до 0,89 для R_a .

Предлагаемая методология диагностики ТС по надёжности обеспечения параметров качества обрабатываемых поверхностей деталей машин не является единственной. По мнению авторов, она является одной из возможных, малозатратных и эффективных.

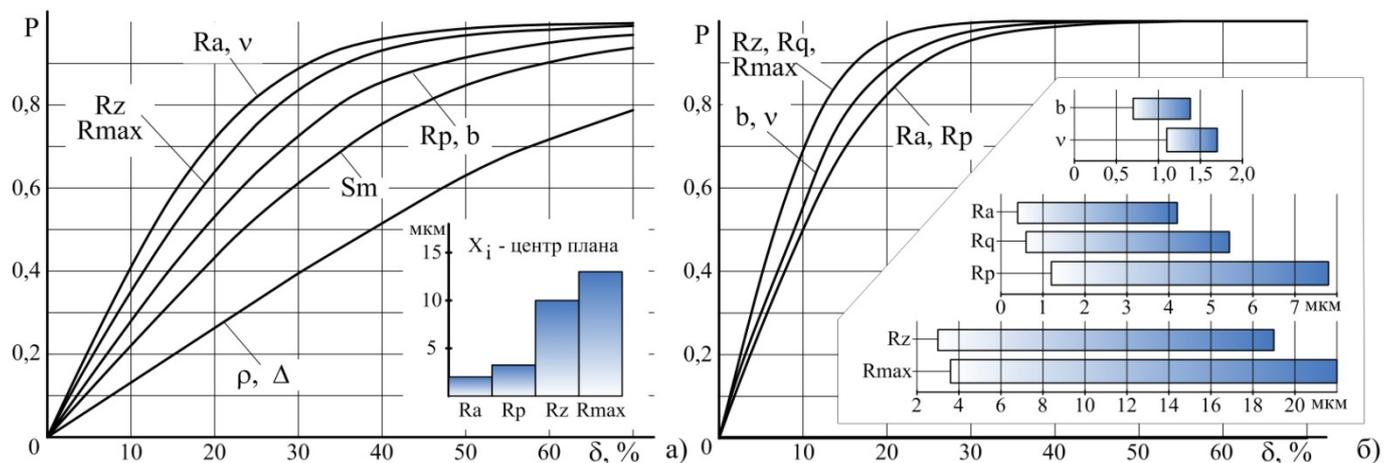


Рис. 8. Вероятность технологического обеспечения параметров шероховатости и диапазоны устойчивого технологического управления ими:

а – в ТС обработки плоских поверхностей торцевым фрезерованием композитом 10 и АВ; б – в ТС обработки цилиндрических поверхностей точением композитом 10 и АВ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
2. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко [и др.]; под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение. 2006. – 447 с.
3. Суслов, А.Г., Федоров, В.П., Нагоркин, М.Н., Пыриков, И.Л. Комплексный подход к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2018. – № 10(88). – С. 3-13.
4. Фёдоров, В.П., Нагоркин, М.Н., Пыриков, И.Л., Ивахненко, А.Г., Федяева, Г.А., Потапов, Л.А. Автоматизация диагностики технологических систем по параметрам качества поверхностей обрабатываемых деталей // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2012. – № 1(33). – С. 85-94.
5. Нагоркин, М.Н. Параметрическая надежность технологических систем чистовой и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин инструментами из сверхтвердых синтетических материалов. Монография. / Под ред. А. В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 304 с.
6. Фёдоров, В.П., Нагоркин, М.Н., Пыриков, И.Л., Трегьяков, В.В. Аппаратно-программные интерфейсы автоматизированных систем диагностики технологических процессов механической обработки поверхностей деталей машин // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сент. 2016 г. Т. 2. – Донецк: МСМ, 2016. – С. 145-148.

REFERENCES

1. Suslov, A.G. *Quality of Machinery Surface Layer*. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.
2. *Technological Assurance and Operation Properties Increase of Parts and Their Joints* / A.G. Suslov, V.P. Fyodorov, O.A. Gorlenko [et al.]; under the general editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering. 2006. – pp. 447.
3. Suslov A.G., Fyodorov V.P., Nagorkin M.N., Pyrikov I.L. Complex approach to experimental investigations of technological systems for metal working to ensure quality parameters and operation properties of machinery surfaces // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2018. No.10 (88). pp. 3-13.
4. Fyodorov V.P., Nagorkin M.N., Pyrikov I.L., Ivakhnenko A.G., Fedyeva G.A., Potapov L.A. Diagnostics automation of technological systems on surface quality parameters of parts under working // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2012. No.1 (33). pp. 85-94.
5. Nagorkin M.N. *Parameter Reliability of Technological Systems for Finishing and Finishing-Strengthening of Machinery Surfaces with Super-hard Synthetic Tools*. Monograph. / under the editorship of A.V. Kirichek. – M.: “Spectrum” Publishers, 2017. – pp. 304.
6. Fyodorov V.P., Nagorkin M.N., Pyrikov I.L., Tretiyakov V.V. Hardware-software interfaces of automated systems for diagnostics of technological processes for machining of machinery surfaces // *Mechanical Engineering and Technology of the XXIst century. Proceedings of the XXIIIrd Inter. Scientif-tech. Conf.* in Sevastopol. September 12-18, 2016, Vol. 2. – Donetsk: MSM, 2016. – pp. 145-148.

Рецензент д.т.н. Ю.Л. Чигиринский

УДК 621.81

DOI:10.30987/2223-4608-2020-2020-1-24-30

А.В. Тотай, д.т.н.

(Брянский государственный технический университет, 241035, г. Брянск, Бульвар 50-летия Октября, 7)

E-mail: totai_av@mail.ru

Повышение эксплуатационной надежности деталей технологическим управлением физико-химическими параметрами их поверхностных слоев

На основе фундаментальных положений теории пластических деформаций металлов установлены дополнительные резервы в повышении эксплуатационной надежности деталей машин, работающих в условиях циклических нагрузжений и трения скольжения.

Ключевые слова: поверхностный слой; условия деформации; массоперенос; сопротивление усталости; период приработки.

A.V. Totay, Dr. Sc. Tech.

(Bryansk State Technical University, 7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk, 241035)

Increase of parts operation reliability by technological control of physical-chemical parameters of their surface layers

On the basis of fundamental regulations of the theory of metal plastic deformations there are defined additional reserves in the operation reliability increase of machinery operated under conditions of cyclic loadings and sliding friction.

Keywords: surface layer; deformation conditions; mass transfer; fatigue resistance; running-in.