

М. Н. Нагоркин, канд. техн. наук, доц., **В. П. Фёдоров**, д-р техн. наук, проф.,
Е. В. Ковалёва, канд. техн. наук, доц., **М. П. Топорков**, канд. техн. наук, доц.
Брянский государственный технический университет, Россия
Тел.: 00-7 (4832) 68-89-61, E-mail: nagorkin@tu-bryansk.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В НЕОДНОРОДНЫХ УСЛОВИЯХ

В статье рассматривается логическая модель технологического обеспечения параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин для эксплуатации в неоднородных условиях. Представлены некоторые результаты формирования требуемых параметров качества в технологических системах повышенной гибкости.

Ключевые слова: условия эксплуатации, управляемые факторы технологической обработки, закономерность изменения параметров качества, технологическая гибкость

M. N. Nagorkin, V. P. Fyodorov, E. V. Kovalyova, M. P. Toporkov

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF PARAMETERS OF QUALITY AND OPERATIONAL PROPERTIES OF SURFACES OF MACHINE COMPONENTS FOR OPERATION IN NON-UNIFORM CONDITIONS

In article the logical model of technological support of parameters of quality and operational properties of surfaces of machine components for operation in non-uniform conditions is considered. Some results of formation of the demanded quality parameters in technological systems of the increased flexibility are presented.

Key words: operating conditions, the operated factors of technological processing, regularity of change of parameters of quality, technological flexibility

1. Введение

Недостатком технологического обеспечения эксплуатационных свойств соединений до недавних пор являлось требование однородности качества контактирующих поверхностей, которое обуславливалось жёсткостью условий обработки в пределах перехода, связанных со спецификой работы технологического оборудования.

В процессе эксплуатации детали машин подвергаются воздействию комплекса факторов, компоненты которого в общем случае являются случайными величинами, что неизбежно влечёт за собой (при однородности качества) анизотропию эксплуатационных свойств поверхности в целом. Наиболее ярким примером в этом плане является неравномерная "выработка" направляющих элементов типа трения скольжения (станины, планки, штанги и др.) технологического оборудования и оснастки, обусловленная взаимодействием однородности качества функциональных поверхностей с нестабильностью условий эксплуатации. Результатом является потеря точности как одной из важнейших функций технологического оборудования.

Для получения поверхностей с равномерными эксплуатационными свойствами целесообразно использовать методы, позволяющие в процессе обработки варьировать такими управляющими факторами, как силовые (статические и динамические), кинематические (скорость, подача, направление), электрофизические (сила тока, скважность импульсов, энергия излучения, перекрытие зон лазерного воздействия) и др.

Процесс обработки поверхностей деталей при решении задачи адаптации поверхности к переменным условиям эксплуатации должен быть гибким, позволяющим

обеспечить заданную неоднородность параметров качества, то есть закон их изменения в функциях координат поверхности.

Для решения задач технологического обеспечения требуемых параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин, работающих в нестационарных условиях, необходим определённый подход к выбору и разработке технологических методов повышения эксплуатационных свойств соединений.

2. Основное содержание и результаты работы

Соединения деталей машин, определяющие надёжность и эффективность работы изделия, эксплуатируются, в основном, в двух режимах: стационарном и нестационарном. Стационарным режимам эксплуатации технических объектов свойственно постоянство внешних воздействий на поверхности контакта ($\bar{P} = const$). В большинстве случаев имеют место нестационарные условия эксплуатации ($\bar{P} = var$), характеризующиеся неравномерным распределением нагрузок, скоростей относительного скольжения и других возмущающих воздействий как по координатам X контактирующих поверхностей деталей, так и во времени, то есть в пространственно-временной области [1].

В таких случаях при изотропности параметров качества поверхностного слоя (КПС) будет иметь место анизотропность эксплуатационных свойств (ЭС) поверхности ($\overline{ЭС} = var$), проявляющаяся, например, в различных величинах триботехнических параметров и контактной жёсткости её отдельных локальных участков, потере ими требуемой герметичности и т. д.. Это будет отрицательно сказываться на ЭС изделия в целом на определяющем этапе его жизненного цикла.

На рис. 1. представлена графовая модель формирования параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей трибоэлементов. Вершины $S_0 \dots S_4$ соответствуют состояниям функциональных поверхностей трибоэлемента на различных уровнях жизненного цикла: I – исходном, II – технологическом, III – эксплуатационном. Дуги переходов U_{ij} из i -й вершины в j -ю, характеризуются видом функций изменения параметров $\bar{R}, \bar{K}, \bar{P}, \overline{ЭС}$ в зависимости от пространственной координаты X (например, длина плоской направляющей трения скольжения). К этим параметрам относятся множество условий обработки \bar{R} , параметры КПС \bar{K} , условия эксплуатации \bar{P} (нагрузка, скорость относительного скольжения, температура, динамические факторы и др.), параметры эксплуатационных свойств $\overline{ЭС}$.

Вершины графа S_1 и S_3 соответствуют изотропности, а вершины S_2 и S_4 – анизотропности параметров качества (S_1, S_2) и параметров эксплуатационных свойств (S_3, S_4) функциональных поверхностей трибоэлементов.

Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин позволяет достичь двух возможных вершин графовой модели:

- S_3 – параметры эксплуатационных свойств не являются функцией от X и постоянны;
- S_4 – параметры эксплуатационных свойств являются функцией от X и переменны.

При установлении требований к качеству продукции наиболее востребованным является состояние S_3 . В современных условиях производства оно может быть достигнуто в соответствии с логическим выражением

$$S_3 = (U_{01} \wedge U_{13}) \vee (U_{02} \wedge U_{23}).$$

Традиционным являлся следующий путь эволюции исходного стабильно изо-

тропного состояния поверхности S_0 до эксплуатационного состояния S_3 :

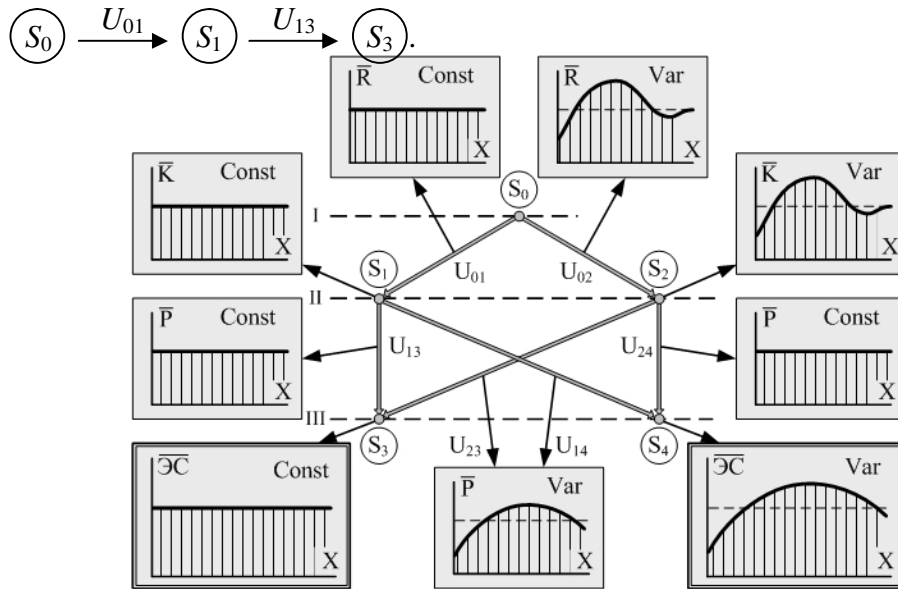


Рис. 1. Модель формирования параметров качества и эксплуатационных свойств функциональных поверхностей трибоэлементов: I, II, III – исходный, технологический и эксплуатационный уровни;

\bar{R} – вектор условий обработки; \bar{K} – вектор параметров качества поверхностного слоя; \bar{P} – вектор условий эксплуатации; \bar{ES} – вектор параметров эксплуатационных свойств; X – координата точки приложения воздействий на поверхность трибоэлемента

На практике имеют место ситуации, когда условия эксплуатации \bar{P} соединения трибоэлементов являются нестационарными. В этом случае функциональные поверхности со стационарными параметрами качества $\bar{K} = const$ под воздействием нестационарных эксплуатационных нагрузок $\bar{P} = var$ характеризуются нестационарным вектором показателей эксплуатационных свойств \bar{ES} , что соответствует состоянию S_4 на графовой модели (рис. 1), которого можно достигнуть по пути

$$S_0 \xrightarrow{U_{01}} S_1 \xrightarrow{U_{14}} S_4.$$

Для обеспечения стационарности и стабильности характеристик ЭС, то есть их изотропности по поверхности трибоэлемента, необходимо технологическое обеспечение закономерного изменения соответствующих параметров КПС по соответствующей координате поверхности, иными словами, их требуемой анизотропности. Это достигается по пути

$$S_0 \xrightarrow{U_{02}} S_1 \xrightarrow{U_{23}} S_3. \tag{1}$$

Реализация этого пути является актуальной проблемой технологии машиностроения в области технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин. Этому способствует решение ряда следующих задач.

1. Определение пространственно-временных закономерностей эксплуатационных факторов, действующих в сопряжениях ($P_i = f_{i1}(X), P_i = f_{i2}(t)$) и характеризующих нестационарность условий эксплуатации.

2. Выявление соответствующих закономерностей изменения значений параметров КПС по поверхности трибоэлемента в функции её координаты X ($K_i = f_i(X)$), способных компенсировать нестационарность условий эксплуатации и обеспечить состояние поверхности S_3 , то есть её изотропность по параметрам эксплуатационных свойств.

3. Формирование гаммы эффективных технологических методов обработки, позволяющих реализовать требуемые закономерности изменения значений параметров качества поверхности (наклёп, остаточные напряжения, шероховатость и др.) в функции координат обрабатываемой поверхности ($K_i = f_i(X)$). То есть реализуется путь U_{02} , решающий задачу достижения вершины S_3 (рис. 1), и, следовательно, задачу достижения изотропности поверхности по параметрам эксплуатационных свойств при нестационарных условиях эксплуатации.

Решение задачи 1 целесообразно искать исходя из следующих предпосылок [2, 3].

В процессе эксплуатации пар трения скольжения (рис. 2а) со стороны элемента 1 на поверхность Π элемента 2 в общем случае могут действовать следующие виды нагрузок: 1) статическая ($P_1 = P_0 = const$); 2) динамическая P_2 , которая в частном случае может иметь амплитуду a_p и период T ; 3) P_3 – нагрузка в виде стационарной случайной функции с математическим ожиданием $M\{P_3\} = P_0 = const$ (рис. 2б); 4) $P_4 = F(X)$ – закономерно изменяющаяся (имеющая экстремум или монотонная) (рис. 2в); P_5 – нагрузка в виде нестационарной случайной функции, математическое ожидание которой (в данном случае $M\{P_5\} = P_4$) зависит от X (рис. 2в).

Вид нагрузки, передаваемый со стороны элемента 1 на поверхность Π не определяет однозначно условия эксплуатации соединения.

Одним из важных факторов, определяющих эпюру износа h поверхности Π базового трибоэлемента (БТЭ) 2, является функция распределения $f(x)$ координаты X положения мобильного трибоэлемента (МТЭ) 1 по оси X (рис. 2г).

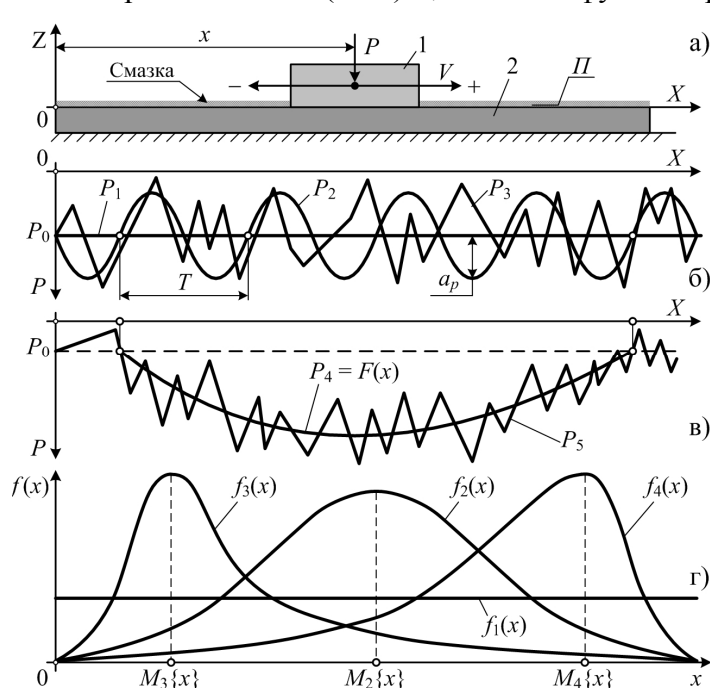


Рис. 2. Модель соединения (пара трения скольжения) (а), возможные виды действующих нагрузок P (б, в) и законы распределения величины x (г)

Величина износа h поверхности Π будет равномерной при нагрузке P_1 и равномерном законе распределения $f_1(x)$. Имеется в виду, что параметры КПС распределены изотропно по поверхности. При любой стационарной нагрузке P_1, P_2, P_3 , но при распределениях $f_i(x)$, отличных от равномерного $f_1(x)$, величина износа h поверхности Π будет распределена неравномерно. Это приводит в общем случае к потере точности и выходу из строя оборудования, особенно технологического.

В этом случае наиболее худшая ситуация возникает при действующих нагрузках P_4 и P_5 и функции распределения положения f_2 ползуна 1 относительно поверхности Π .

В окрестностях точки $M_2\{x\}$ ($X = M_2\{x\} \pm k\sigma(x)$) будет наблюдаться повышенный износ, величина которого пропорциональна функции $F(X)$.

Всё это относится и к цилиндрическим направляющим трения скольжения [1, 2, 4].

Таким образом, стабильность условий эксплуатации соединений трения скольжения характеризуется законом действия нагрузки $P_i = f_i(x)$ и плотностью распределения положения точки её приложения к поверхности $f_i(x)$.

Решение задач 2 и 3, то есть реализация пути (1) с позиций системного подхода должно базироваться на следующих принципах.

1. *Принцип определённости.* Возможность аргументированного назначения на рабочих чертежах детали параметров качества их функциональных поверхностей, исходя из реальных будущих условий эксплуатации.

2. *Принцип существования.* Возможность аргументированного выбора наиболее эффективного метода обработки из допустимых, обеспечивающего технические требования. Сущность этого принципа заключается в том, что существуют эффективные технологические методы обработки, обеспечивающие заданные законы распределения параметров качества по обрабатываемой поверхности детали, диктуемые нестационарностью условий эксплуатации.

3. *Принцип управляемости.* Возможность технологического управления заданными параметрами качества поверхности (или эксплуатационных свойств) в регламентируемых пределах варьирования с требуемой надёжностью по заданному закону.

4. *Принцип физической реализуемости.* Подразумевает возможность в заданных условиях реализовать соответствующий технологический процесс или экономически обоснованную возможность воспользоваться услугами других предприятий.

Что касается принципа определённости, то к настоящему времени существуют данные по законам формирования показателей эксплуатационных свойств в зависимости от условий эксплуатации и параметров качества поверхностей элементов соединений, а также имеется чёткий научно обоснованный набор параметров КПС, технологическое обеспечение которых гарантирует получение заданных показателей эксплуатационных свойств с требуемой надёжностью [5].

Принципы существования и управляемости по своей сути требуют наличия возможности изменения режимов обработки при формировании элементарной поверхности, которая является функциональной с заданным законом изменения параметров качества в пространственной области. Это означает, что условия обработки должны быть управляемыми в пределах перехода, что можно реализовать в системах, обладающих достаточно высокой технологической гибкостью, под которой понимается способность ТС обеспечить заданные множества параметров КПС или ЭС в регламентированных интервалах с заданной надёжностью путём направленного варьирования условиями обработки и управления механизмом технологического наследования.

Существует два рода технологической гибкости систем обработки (ТГС):

1) технологическая гибкость 1-го рода – имеется возможность выбора гаммы методов обработки поверхностей (в общем случае различной физической природы) для заключительных операций технологического процесса и группы управляемых факторов каждого из методов, постоянных по величине в пределах соответствующего перехода и обеспечивающих изотропность поверхности по регламентируемым значениям параметров КПС в заданных пределах с требуемой надёжностью;

2) технологическая гибкость 2-го рода – имеется возможность выбора несколь-

ких методов обработки поверхностей (в общем случае различной физической природы) для заключительных операций технологического процесса и группы управляемых факторов каждого из методов, одним или несколькими из которых можно программно управлять в пределах перехода по закону, обеспечивающему в итоге заданную анизотропность распределения параметров КПС или ЭС по обрабатываемой поверхности с требуемой надёжностью.

Для систем с технологической гибкостью 2-го рода целесообразно ввести понятия степеней свободы, число которых однозначно соответствует числу факторов режимов обработки, которыми можно программно управлять в пределах перехода, то есть в процессе обработки одной элементарной поверхности.

Все системы обработки поверхностей, в которых отсутствуют элементы программного управления типа CNC, обладают технологической гибкостью первого рода. К ним можно отнести следующие методы формирования поверхностей деталей машин на чистовых и финишных стадиях технологического процесса обработки: 1) резание (чистовое и тонкое точение, фрезерование, шлифование, алмазно-абразивная обработка и др.); 2) резание + нанесение покрытий (гальванические, ФАБО, твёрдые нитридсодержащие, лазерное легирование, ионная имплантация и др.); 3) резание + ППД (накатывание шариками, роликами, дорнование, алмазное выглаживание, вибронакатывание, вибровыглаживание и др.); 4) резание + ППД + покрытия; 5) резание + покрытия + ППД; 6) электрофизические и электрохимические методы обработки [2, 5, 6, 7].

Технологическая гибкость 2-го рода присуща технологическим системам с ЧПУ, где имеется возможность изменять условия обработки (факторы) программным способом в пределах перехода. В таких системах могут быть реализованы перечисленные методы обработки поверхностей с более высокой эффективностью.

Из указанных методов формирования поверхностей деталей машин можно выделить обработку ППД в силу того, что она весьма эффективна как финишная, позволяющая надёжно управлять параметрами КПС в широких пределах, и как эффективный компонент комбинированных систем обработки, связанных с нанесением различных износостойких приработочных покрытий.

Эффективность методов ППД подтверждается результатами микротопографического анализа обработанных поверхностей (рис. 3), проведенного с использованием компьютеризированной системы металлографических исследований [6]. Установлено, что за счёт варьирования условиями ППД (предварительная обработка, вид и режимы ППД) можно управлять оптическими параметрами обрабатываемой поверхности (например, яркостью).

Гистограммы яркости и соответствующие профили яркости поверхности строятся для черно-белых тонов. При шкале цветовой гаммы 8bit белый цвет оценивается яркостью $E_{max} = 255$, а чёрный – $E_{min} = 0$. В этих пределах изменяется яркость поверхности на гистограммах и профилях яркости (рис. 3). Для практических целей предлагается нормировать текущее значение яркости поверхности $E_{тек}$ по максимальной величине $E_{max} = 255$ и ввести коэффициент яркости: $R_E = E_{тек}(x) / E_{тек}$, где x – рассматриваемая координата поверхности на трассе измерения (A, B).

Таким образом, получаем график зависимости $R_E = f(x)$, по форме идентичный профилям яркости, но величина R_E теоретически изменяется в пределах от 0 до 1: чисто чёрный цвет – $R_E = 0$; чисто белый цвет – $R_E = 1$. Для такой оценки яркости поверхности, для величины R_E были введены следующие числовые характеристики

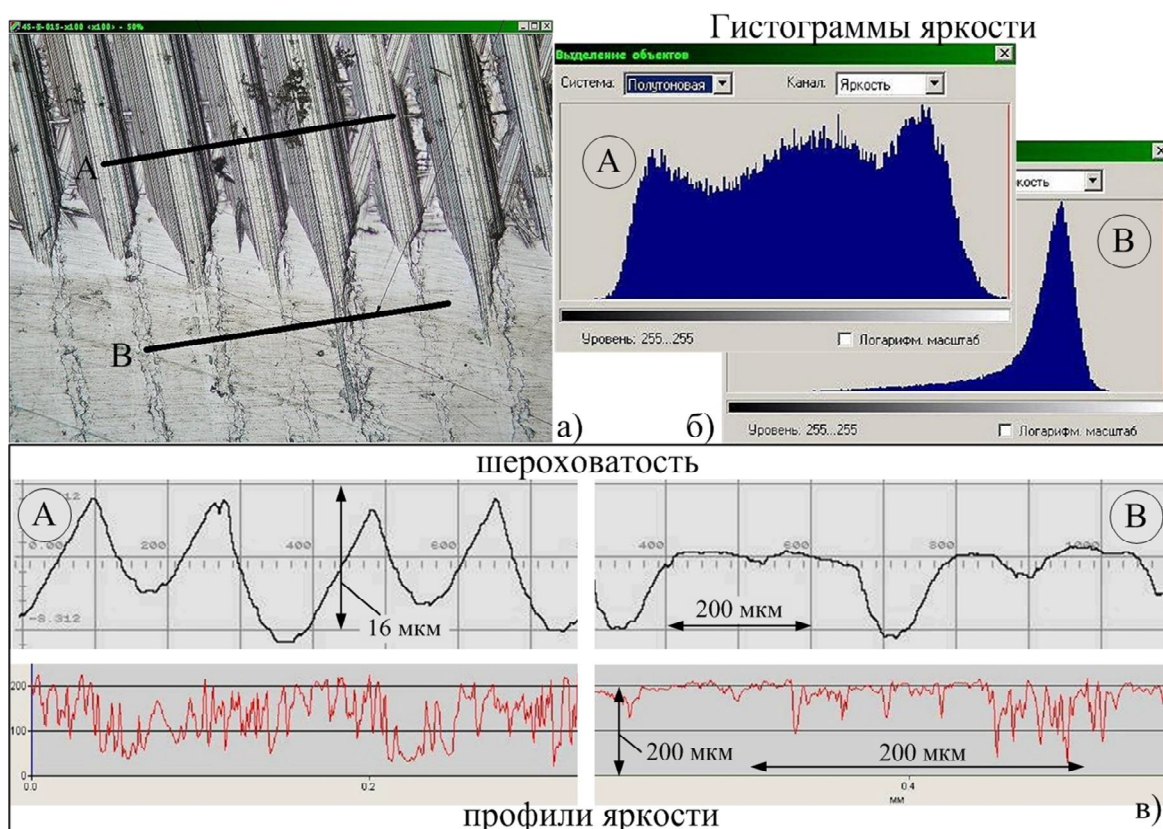


Рис. 3. Результаты микротопографического исследования поверхности образца из стали 45: а – микротопография (А – торцевое фрезерование, $R_a = 4,5$ мкм, $R_{max} = 20,8$ мкм, $R_p = 10,8$ мкм; В – последующее алмазное выглаживание, $R_a = 2,3$ мкм, $R_{max} = 12,9$ мкм, $R_p = 3,5$ мкм); б – гистограммы яркости; в – фрагменты профилограмм шероховатости и профилей яркости

1. Максимальное R_{Emax} и минимальное R_{Emin} значения коэффициента яркости и его максимальный перепад: $\Delta(R_E) = R_{Emax} - R_{Emin}$. Для идеально однотонной поверхности $\Delta(R_E) = 0$.

2. Среднее арифметическое значение коэффициента яркости:

$$\bar{R}_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{Ei},$$

где R_{Ei} – i -ое значение R_E в серии из n измерений. Величина R_E количественно характеризует среднюю яркость или средний тон поверхности в черно-белых оттенках.

Количественные оценки яркости R_{Emax} , R_{Emin} , $\Delta(R_E)$, \bar{R}_E имеют четкий физический смысл и могут применяться для исследований по технологическому обеспечению тоновых или яркостных параметров качества обрабатываемых поверхностей.

Широкие возможности обеспечения изотропности эксплуатационных свойств поверхностей деталей открываются при реализации их обработки методами ППД на станках с числовым программным управлением. Синтез ППД и ЧПУ при применении управления обработкой от персонального компьютера (ПК) позволяет реализовать обработку поверхностей деталей машин поверхностным пластическим деформированием программным способом (ППДПС), которая применима для обработки как плоских, так

и цилиндрических, торцевых, конических и др., образующие которых имеют аналитическое описание. При этом решается широкий спектр вопросов инженерии поверхности, включая её предварительное моделирование, анализ и обработку.

Метод ППДПС позволяет создавать на обрабатываемой поверхности микрорельефы с управляемой структурой и параметрами, что крайне важно для управления трибологическими процессами в эксплуатации.

Гибридизация ТС обработки ППД с системой ЧПУ (в простейшем случае типа NC) позволяет резко расширить её технологические возможности, осуществлять операции различного технологического назначения: размерная обработка ППД программным способом, нанесение покрытий – и всё это при максимальной технологической гибкости, так как имеется и реализуется возможность программного управления режимами обработки в пределах перехода. С учётом возможностей ПК его гибридизация даже с простой системой ЧПУ типа NC порождает систему PCNC – систему с совершенно иными, расширенными функциональными возможностями [2, 6].

Разработанные математическое и программное обеспечение позволяет осуществлять компьютерное моделирование процесса обработки и её последующую физическую реализацию на заготовке с визуализацией на мониторе ПК. Некоторые результаты моделирования и реализации микрорельефов в системе ППДПС "Контур ПК-NC-01" представлены на рис. 4.

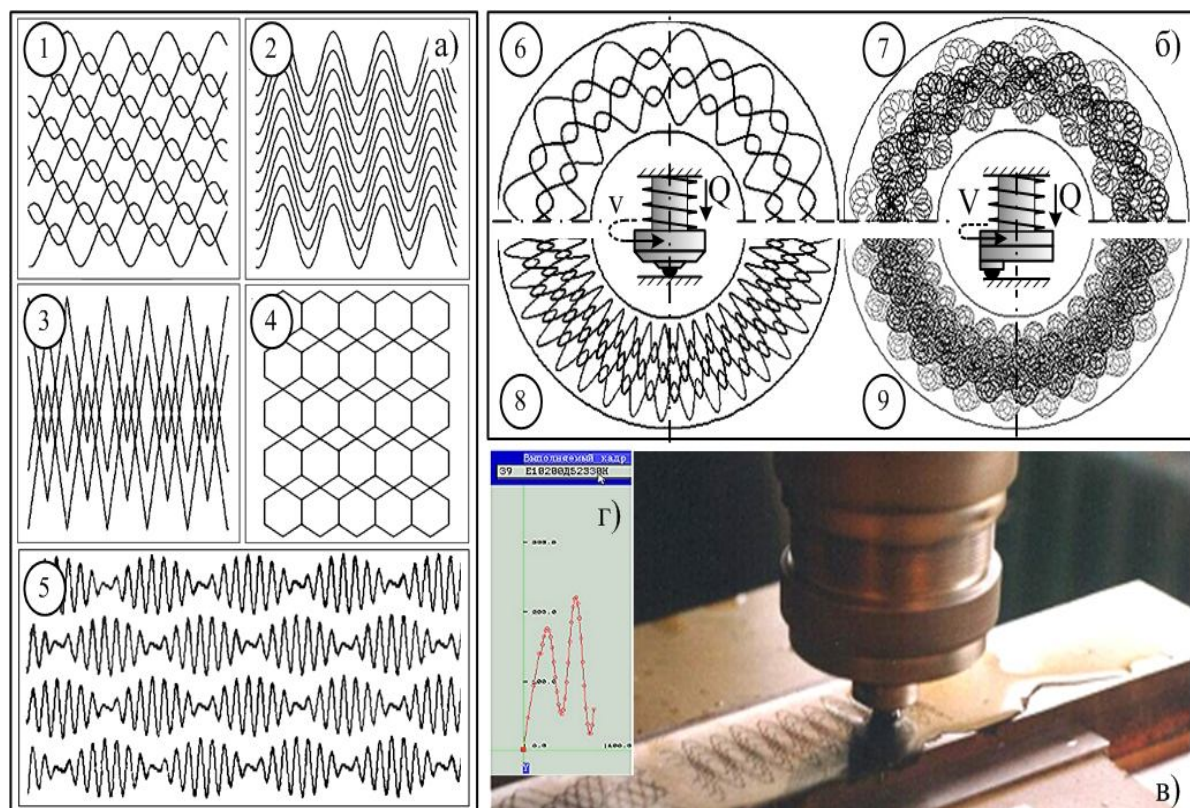


Рис. 4. Моделирование и реализация микрорельефов методом ППДПС: а – модели для плоских поверхностей типа направляющих скольжения; б – модели для торцевых поверхностей; в – реализация микрорельефа на детали; г – программная визуализация процесса обработки

Модели 1...5 получены для реализации на плоских поверхностях типа направляющих скольжения. Они регулярны, но не все синусоидальны (3, 4). Модель 5 – микрорельеф с амплитудной модуляцией (РАМ-рельеф). Традиционными способами (известные методы Ю. Г. Шнейдера) реализуются в основном только синусоидальные микрорельефы (1, 2). Модели 6...9 получены для реализации на фланцевых поверхностях. Модели 7, 9 соответствуют обработке ППДПС инструментом с центрально расположенным индентором (ЦИ), а модели 8, 9 – с периферийным расположением индентора (ПИ). При моделировании в случаях 8...9 (рис. 4) предусмотрено изменение силы воздействия индентора на поверхность в процессе обработки программным способом. Тёмные линии рельефа соответствуют увеличению силы воздействия индентора. Таким образом, тёмные участки моделей указывают на изменения параметров КПС и ЭС соответствующих участков обработанных реальных поверхностей, то есть осуществляется программное управление параметрами качества в функции её координат, то есть реализуется переход U_{02} графовой модели (рис. 1).

Технологический процесс ППДПС устройствами упругого действия обладает технологической гибкостью второго рода, что позволяет адаптировать поверхность детали к реальным условиям эксплуатации, заданным, например, в виде закона распределения координаты прилагаемой максимальной нагрузки на соединение (рис. 2в, г), путём программного управления режимами обработки в пределах перехода (сила Q , подача S , скорость V).

3. Заключение

Для обеспечения высоких эксплуатационных свойств соединений, работающих при нестационарных внешних воздействиях (нагрузка, скорость и др.), необходимо исследование характера нестационарностей, создание и применение технологически гибких процессов обработки функциональных поверхностей трибоэлементов.

Изотропность обрабатываемой поверхности по показателям эксплуатационных свойств, то есть её адаптация к нестационарным внешним воздействиям на соединение обеспечивается в технологически гибких системах 2-го рода за счёт изменения значений доминирующих факторов обработки по заданному закону при соблюдении принципов определённости, существования, управляемости, физической реализуемости.

Современным системам обработки присуща технологическая гибкость 1-го и 2-го рода: технологически гибкие системы 1-го рода обеспечивают эффективную, но жёсткую обработку в пределах перехода, а 2-го рода – обеспечивают эффективную и управляемую программным способом обработку в пределах перехода.

Среди систем с технологической гибкостью 1-го рода наибольшей эффективностью обладают системы, сочетающие обработку поверхностей методами различной физической природы (обработка резанием, нанесение покрытий, ППД и др.). Гибридизация методов обработки с системами ЧПУ образует класс систем с технологической гибкостью 2-го рода, обладающих более высокой технологической гибкостью. В этом плане перспективно практическое применение ППД программным способом (ППДПС).

Перспективным технологическим приёмом адаптации поверхностей трибоэлементов к нестационарным условиям эксплуатации является обработка ППД программным способом и методы обработки, содержащие её как один из основных компонентов.

Обработка ППДПС позволяет реализовать на поверхностях трибоэлементов специфические типы микрорельефов, позволяющие решать вопросы повышения герметичности, маслоёмкости, формирования требуемых физических параметров потока смазочных материалов (число Рейнольдса и др.) и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нагоркин М. Н. Условия эксплуатации функциональных поверхностей трибоэлементов в типовых соединениях трения скольжения / М. Н. Нагоркин, В. П. Фёдоров, А. В. Тотай // Известия Юго-Западного государственного университета – Курск: ЮЗГУ, – №6 (57), 2014 – С. 15–26
2. Фёдоров В. П. Технологическое обеспечение закономерного изменения параметров качества поверхности детали в процессе обработки [Текст]+[Электронный ресурс]: монография / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, Е. В. Ковалёва. – Брянск: БГТУ, 2012. – 192 с.
3. Федоров, В. П. Принципы и средства технологического обеспечения заданных законов распределения параметров качества по обрабатываемой поверхности детали / Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки. Коллективная монография. / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин и др.; Под ред. А. В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – С. 173–220.
4. Горленко, А. О. Моделирование контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей трения / А. О. Горленко, В. П. Матлахов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2007. – №8 – С. 1–9.
5. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений. / А. Г. Суслов, В. П. Фёдоров, О. А. Горленко и др.; Под ред. А. Г. Суслова. – М.: Машиностроение. 2006. – 448 с.
6. Фёдоров, В. П. Технологические и метрологические аспекты адаптации поверхностей деталей машин к нестационарным условиям эксплуатации в процессе изготовления / В. П. Фёдоров, М. Н. Нагоркин, И. Л. Пыриков // Справочник Инженерный журнал № 10, 2009. Приложение № 10. – С. 8–15
7. Горленко, А. О. Модификация рабочих поверхностей деталей из конструкционных и инструментальных материалов нанесением упрочняющего нанопокртия. / А. О. Горленко, И. Л. Шупиков, П. А. Тополянский, А. П. Тополянский // Металлообработка. 2012. – № 2 (68). – С. 31–36.

Поступила в редколлегию 10.12.2015 г.