

УДК 621.9

DOI: 10.30987/article\_5c90a59824edf6.80759568

**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: nagorkin\_mn@mail.ru

## **Инженерные методы технологического обеспечения регламентированных параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин в процессе механической обработки**

*Рассмотрены основы инженерных методов технологического обеспечения регламентированных параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин в процессе механической обработки с возможностью заданного закона их изменения в пределах перехода. Показан рекомендуемый путь решения этой задачи, который включает анализ условий эксплуатации деталей и соответствующие им величины и законы изменения обеспечиваемых параметров; вопросы статистического моделирования процессов их формирования; условия технологического обеспечения равномерности поверхностей трения скольжения с примерами технологических систем и результатов их применения с учетом технологической наследственности.*

**Ключевые слова:** технология; шероховатость; статистическое моделирование; качество поверхности; гибкие технологические системы; технологическая наследственность; условия эксплуатации поверхностей.

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

## **Engineering methods for technological support of regulated roughness parameters of machinery operation surfaces during machining**

*There are considered fundamentals of engineering methods for the technological support of roughness regulated parameters of machinery operation surfaces during machining with the possibility of a specified law of their changes within the transition. A recommended way for the solution of this problem which includes the analysis of conditions for parts operation and corresponding to them values and laws for changing parameters supported; the problems of a statistical modeling of their formation processes; the conditions for uniform wear technological support of sliding friction surfaces with examples of technological systems and results of their use taking into account technological heredity.*

**Keywords:** technology; roughness; statistical modeling; surface quality; flexible processing lines; technological heredity; conditions for surface operation.

При решении задач технологического обеспечения качества функциональных поверхностей деталей машин весьма важен учет корреляционных связей между выбранными параметрами качества поверхности, в частности между параметрами шероховатости. Решение этого вопроса позволит обоснованно выбирать минимально необходимое число параметров для их технологического обеспечения. Анализ графов корреляционных связей [2, 3] выявил

практически 100 %-ную корреляцию между всеми стандартизованными параметрами шероховатости. В этом плане, с целью выявления практически линейных связей следует рассматривать не статистически значимые корреляционные связи, а корреляционные связи с коэффициентом корреляции  $r$ , близким к единице.

Установлено [2, 3], что средняя степень вершин графа  $\deg Y_i$  для алмазного выглажи-

вания (АВ) изменяется от 7,4 до 2,0; тогда как соответствующее изменение для предварительной обработки торцевым фрезерованием составляет от 7,44 до 4,44. Это естественно, так как из теории резания известно, что лезвийными методами обработки материалов обеспечивается высокая степень регулярности параметров микропрофиля, особенно высотных, которые можно достаточно точно рассчитать геометрическим путём.

Процесс деформирования микропрофиля поверхности методами ППД зависит как от параметров качества предварительно обработанной поверхности, так и от дополнительных вводимых факторов самого метода, в частности алмазного выглаживания, что обуславливает снижение средней степени вершин графов корреляционных связей при высоких значениях  $r$ . Это закономерно, так как процесс пластического деформирования является нелинейным [1].

Получены физико-статистические модели формирования параметров шероховатости плоских поверхностей деталей из чугуна ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$ ,  $Rp$ ,  $Sm$ ,  $\rho$ ,  $b$ ,  $v$ ,  $\Delta$ ), которые корректны в следующих границах факторного пространства технологических систем (ТС) «торцевое фрезерование ПСТМ + АВ»: подача при фрезеровании  $S_{z\text{фрез}} = 0,05 \dots 0,25$  мм/зуб; скорость фрезерования  $v_{\text{фрез}} = 311 \dots 622$  м/мин; сила выглаживания  $Q = 50 \dots 150$  Н; подача при АВ  $S_{z\text{АВ}} = 0,025 \dots 0,16$  мм/об; скорость АВ  $v_{\text{АВ}} = 35 \dots 90$  м/мин. При исследовании технологической управляемости параметрами качества АВ после шлифования периферией круга режимы шлифования выбирались для обеспечения шероховатости  $Ra_{\text{исх}} = 0,16 \dots 0,6$  мкм.

Рассмотрение интервалов изменения параметров шероховатости поверхностей деталей из чугуна в ходе проведения экспериментов для разных методов обработки показывает достаточно широкий диапазон их варьирования алмазным выглаживанием после предварительного торцевого фрезерования. Это особенно характерно для параметров  $Ra$ ,  $Rp$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$ ,  $Sm$  и  $\Delta H$ . Предварительная обработка шлифованием может быть рекомендована для поверхностей деталей с повышенными требованиями к точности.

Надёжность технологического обеспечения параметров шероховатости в исследуемых ТС АВ определялась как вероятность выполнения задания для параметра  $Y_i$  в симметричном  $\delta$ -интервале  $P\{Y_i \in (\bar{Y}_i \pm \delta \bar{Y}_i)\}$  ( $0 < \delta < 1$ ) по результатам обработки данных машинного

эксперимента.

Установлено, что различные параметры качества при одном и том же допустимом отклонении  $\delta$  (%) от средней заданной величины обеспечиваются с различной надёжностью, которая колеблется при  $\delta = 20$  % для высотных параметров от 0,53 для  $Rp$  до 0,72 для  $Ra$ . Для остальных исследуемых параметров – от 0,25 для  $\rho$ ,  $\Delta$  до 0,72 для  $v$ . Высотные параметры  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$  обеспечиваются с надёжностью  $P = 0,9$  при  $\delta$  до 35 %, параметры  $Sm$ ,  $b$ ,  $v$  – при значении  $\delta$  от 30 до 60 %.

В основу работ по технологическому обеспечению качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин положены методы физико-статистического моделирования, которые базируются на использовании имитационных моделей процессов обработки [2, 6]. В ходе обработки поверхности детали происходит процесс её эволюции от исходной до технологической.

В общем случае технологический процесс может составлять  $q$  технологических систем, входными параметрами которых, например для  $ТС_\varepsilon$ , являются параметры качества поверхности после предшествующего этапа обработки ( $Y_{i(\varepsilon-1)}$ ), управляющими – условия обработки ( $X_{\varepsilon 1}$ ,  $X_{\varepsilon 2}$ , ...,  $X_{\varepsilon \xi}$ ), а выходными – полученные параметры качества поверхности ( $Y_{i\varepsilon}$ ).

Исследование влияния параметров качества плоских поверхностей, полученных при предварительной обработке торцевым фрезерованием, на формирование соответствующих параметров после алмазного выглаживания, которые характеризуют степень технологического наследования, были проведены путём анализа соответствующих корреляционных связей (рис. 1).

Анализ работ по технологическому обеспечению износостойкости трибоэлементов показывает, что нередко авторы рассматривают параметры эксплуатации ( $P$  – давление на единицу площади проекции опорной поверхности;  $v$  – скорость относительного скольжения трибоэлементов) как постоянные величины, стабильные в пространственно-временной области и имеющие фиксированные минимальные и максимальные значения.

Для возвратно-поступательных пар трения скольжения, включающих широкий класс направляющих технологического оборудования и оснастки (от призматических до цилиндрических), характерно изменение нормальной нагрузки  $P$  и скорости относительного скольжения  $v$ , как функций, непрерывно изменяющихся в пространстве и времени. Подробный

анализ изменения функций  $P$  и  $v$  в пространстве и времени дан в работах [2, 3], на основе которого выявлены типовые законы измене-

ния указанных факторов в пространственной области для пар трения типа направляющих скольжения (рис. 2).



Рис. 1. Эволюция поверхности детали от исходной до технологической в процессе прохождения через  $q$  технологических систем обработки

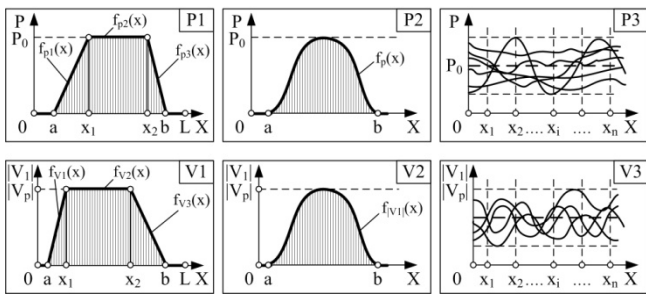


Рис. 2. Типовые законы изменения нагрузки  $P$  и скорости относительного скольжения  $v$  в пространственной области для пар трения типа направляющих скольжения

Наиболее общим законом изменения нагрузки  $P$  в пространственной области является трапецеидальный (случай P1, рис. 2), для которого характерны участки нагружения  $ax_1$ , работы под максимальной нагрузкой  $P_0$  (участок  $x_1x_2$ ) и разгрузки  $x_2b$ . При этом зависимости изменения нагрузки в пространстве координаты поверхности базового трибоэлемента  $X$  могут описываться различными уравнениями для различных участков, например  $f_{p1}(x)$ ,  $f_{p2}(x)$  и  $f_{p3}(x)$ , аналитический вид которых определяется спецификой работы соединения.

Более простым является случай P2 (см. рис. 2), когда зависимость  $f_p(x)$  является непрерывной дифференцируемой функцией, имеющей общее аналитическое описание. Случай P3 (см. рис. 2) – это зависимость нагрузки  $P$  в виде стационарного случайного процесса в функ-

ции координаты поверхности  $X$ .

При рассмотрении скорости  $v$  относительного скольжения трибоэлементов следует иметь в виду её абсолютное значение, так как специфика работы направляющих скольжения технологического оборудования и других машин определяет её знакопеременность. Наиболее общим также является трапецеидальный закон зависимости скорости мобильного трибоэлемента от координаты рассматриваемой точки базового трибоэлемента (случай V1, рис. 2). В этом случае также характерно наличие участка разгона  $ax_1$ , участка  $x_1x_2$  работы трибосистемы со скоростью, близкой к максимальной (возможны случайные флуктуации), и участка торможения  $x_2b$ .

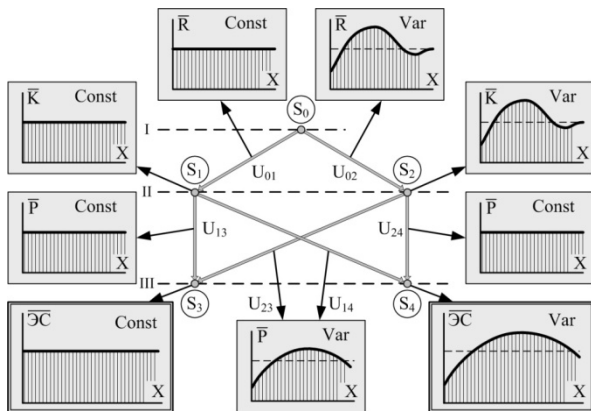
Случай V2 (см. рис. 2) характеризуется возможностью интерпретации зависимости скорости мобильного трибоэлемента  $|v_1|$  от текущей координаты  $X$  рассматриваемой точки базового трибоэлемента непрерывной дифференцируемой аналитической функцией.

Скорость  $|v_1|$  может представлять собой стационарную случайную функцию от координаты  $X$  (случай V3, рис. 2), что характерно при движении трибосистем на малых скоростях, когда возможны случаи торможения и ускорения, например, в связи с процессами схватывания.

Представленный анализ показывает, что для обеспечения равномерного износа направляющих поверхностей деталей машин, а также

технологического оборудования и оснастки при разработке технологии обработки их функциональных поверхностей необходимо учитывать особенности воздействия на них эксплуатационных факторов, в частности нагрузки и скорости относительного скольжения трибоэлементов, формировать соответствующие параметры их качества программным способом в процессе обработки.

На предложенной графовой модели формирования качества и эксплуатационных свойств поверхностей трибоэлементов (рис. 3) [4] представлены в виде вершин состояния функциональных поверхностей трибоэлемента  $S_0...S_4$  для различных уровней жизненного цикла (I...III) и дуги переходов  $U_{ij}$  из  $i$ -й вершины в  $j$ -ю, характеризующиеся видом функций от пространственной координаты  $X$  (например, длина плоской направляющей трения скольжения) и дополнительными параметрами, характеризующими множества условий обработки  $R$ , параметров качества поверхностного слоя (КПС)  $K$ , условий эксплуатации  $P$  (нагрузка, скорость относительного скольжения, температура, динамические факторы и др.). Вершины графа  $S_1$  и  $S_3$  соответствуют изотропности, а вершины  $S_2$  и  $S_4$  – анизотропности качества ( $S_1, S_2$ ) и параметров эксплуатационных свойств ( $S_3, S_4$ ) функциональных поверхностей трибоэлементов.



**Рис. 3. Графовая модель формирования качества и эксплуатационных свойств функциональных поверхностей трибоэлементов:**

I, II, III – исходный, технологический и эксплуатационный уровни;  $R, K, P, ЭС$  – соответственно, векторы условий обработки, параметров качества поверхностного слоя, условий эксплуатации и параметров эксплуатационных свойств;  $X$  – координата точки приложения воздействий на поверхность трибоэлемента

Как итог технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей де-

талей машин возможны две вершины 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 требованиях потребителя к качеству продукции наиболее востребованным является состояние  $S_3$ . В современных условиях производства оно может быть достигнуто в соответствии с логическим требованием:

$$S_3 = (U_{01} \wedge U_{13}) \vee (U_{02} \wedge U_{23}). \quad (1)$$

Традиционным до недавнего времени являлся следующий путь эволюции исходного состояния поверхности  $S_0$ , которое постулируется стабильно изотропным, до эксплуатационного состояния  $S_3$ :

$$S_0 \xrightarrow{U_{01}} (S_1) \xrightarrow{U_{13}} (S_3). \quad (2)$$

Однако на практике имеют место ситуации, когда условия эксплуатации  $P$  соединения трибоэлементов являются нестационарными. В этом случае функциональные поверхности со стационарными параметрами качества  $K = \text{const}$ , под воздействием нестационарных эксплуатационных нагрузок  $P = \text{var}$  характеризуются нестационарным вектором показателей эксплуатационных свойств ЭС, что соответствует состоянию  $S_4$  на графовой модели (см. рис. 3), которого можно достигнуть по пути (3):

$$S_0 \xrightarrow{U_{01}} (S_1) \xrightarrow{U_{14}} (S_4). \quad (3)$$

Для обеспечения стационарности и стабильности характеристик ЭС, т.е. 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 следующему пути:

$$S_0 \xrightarrow{U_{02}} (S_2) \xrightarrow{U_{23}} (S_3). \quad (4)$$

Реализация этого пути является актуальной проблемой технологии машиностроения в области технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин. Её кардинальному решению способствует решение ряда сопутствующих задач, в частности:

1. Определение пространственно-временных закономерностей эксплуатационных факторов, действующих на сопряжение ( $P_i = f_{i1}(X), P_i = f_{i2}(t)$ ), 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  $S_3$ , т.е. её изотропность по параметрам эксплуатационных свойств.

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

Решение задачи 1 целесообразно искать исходя из следующих предпосылок: в процессе эксплуатации пар трения скольжения на поверхности трибоэлементов в общем случае могут действовать следующие виды нагрузок:

- 1) статическая ( $P_1 = P_0 = \text{const}$ );
- 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  $M\{P_3\} = P_0 = \text{const}$ ;
- 4)  $P_4 = F(X)$  – закономерно изменяющаяся (имеющая экстремум или монотонная);
- 5)  $P_5$  – нагрузка в виде нестационарной случайной функции, математическое ожидание которой (в данном случае  $M\{P_5\} = P_4$ ) зависит от  $X$ .

Вид нагрузки, передаваемый на функциональную поверхность детали, не определяет однозначно условия эксплуатации соединения. Одним из важных факторов, определяющих эпюру износа  $h$  поверхности, является функция распределения  $f(x)$  координаты  $X$  положения мобильного (подвижного) трибоэлемента. Величина износа  $h$  поверхности будет равно распределённой 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  $\Pi$  будет распределена неравномерно. Это приводит в общем случае к потере точности и выходу из строя оборудования, особенно технологического.

Для получения поверхностей с равномерными эксплуатационными свойствами (ЭС) необходимо использовать методы, позволяющие непосредственно в процессе обработки варьировать силовыми, кинематическими и другими технологическими факторами. Таким образом, процесс обработки при решении задачи адаптации поверхности к переменным условиям эксплуатации должен быть гибким, обеспечивающим заданное закономерное изменение качества поверхностного слоя.

Под гибкостью технологической системы следует понимать способность обеспечить заданное множество параметров КПС детали или ЭС в регламентированных интервалах с заданной надёжностью путём направленного варьирования условиями обработки и управления механизмом технологического наследования. В этом плане следует различать два рода технологической гибкости систем обработки:

- 1) технологическая гибкость 1-го рода (ТГС-1) – возможность выбора методов обработки поверхностей и группы управляемых факторов каждого из них, постоянных по величине в пределах соответствующего перехода и обеспечивающих изотропность поверхности по регламентируемым значениям параметров КПС или ЭС с требуемой надёжностью;
- 2) технологическая гибкость 2-го рода (ТГС-2) – возможность выбора методов обработки поверхностей и группы управляемых факторов, одним или несколькими из которых можно программно управлять в пределах перехода по закону, обеспечивающему заданную анизотропность распределения параметров КПС или ЭС по обрабатываемой поверхности с требуемой надёжностью. Таким образом, технологическая гибкость систем обработки является одним из критериев повышения качества обрабатываемых поверхностей.

Технологическая гибкость 2-го рода присуща системам ЧПУ, где имеется возможность изменять условия обработки (факторы) программным способом в пределах перехода или сложным технологическим системам, в которых одна или несколько подсистем оснащены оборудованием с ЧПУ.

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.

Понятие степеней свободы системы с технологической гибкостью 2-го рода можно пояснить следующим образом (рис. 4) [2, 3 и др.].

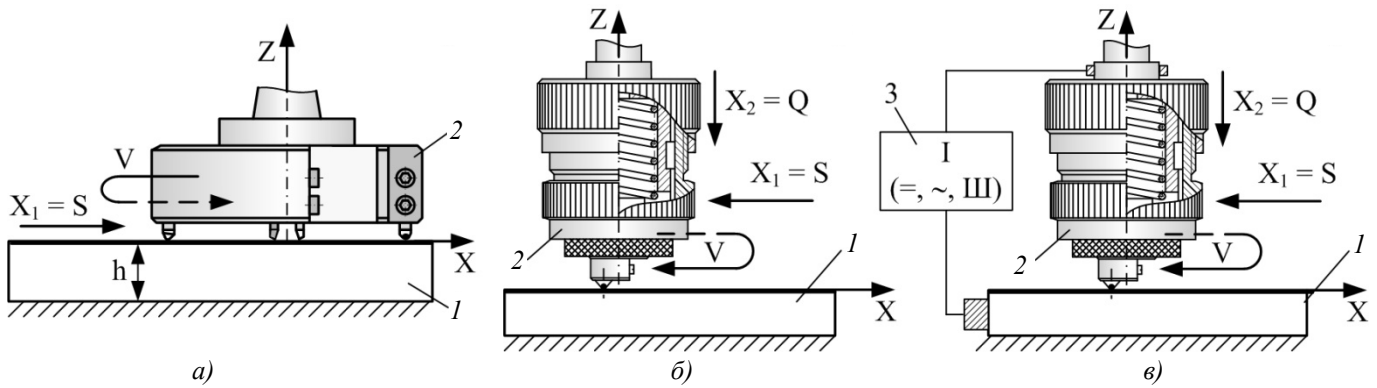


Рис. 4. Примеры систем обработки плоских поверхностей с технологической гибкостью 2-го рода:

*а* – торцевое фрезерование; *б* – накатывание шариком или алмазное выглаживание инструментом упругого действия; *в* – электромеханическая обработка инструментом упругого действия; 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – инструмент; 3 – программируемый источник постоянного, переменного или импульсного напряжения

При торцевом фрезеровании на станке с ЧПУ плоской функциональной поверхности обрабатываемой заготовки 1 (рис. 4, *а*) в пределах перехода имеется возможность управлять лишь одним параметром подачи  $S = X_1$  при условии необходимости сохранения размера  $h$ . Следовательно, это система ТГС-2 с одной степенью свободы.

Примером системы обработки ТГС-2 с двумя степенями свободы может служить ТС накатывания (алмазного выглаживания) с ЧПУ типа CNC, которая обеспечивает возможность программного управления в пределах перехода двумя факторами обработки: величиной подачи  $S = X_1$  и силой  $Q = X_2$  (рис. 4, *б*).

Электромеханическая обработка (рис. 4, *в*) является примером эффективной технологической системы ТГС-2, обладающей тремя степенями свободы: величиной подачи  $S = X_1$ , силой обработки  $Q = X_2$  и силой тока  $I = X_3$ , проходящего через площадку контакта между индентором и обрабатываемой поверхностью при наличии устройства 3 программного управления силой тока.

Очевидно, что важным показателем процесса обработки является степень его технологической гибкости. Если взять режимы обработки для точения ( $v, S, t$ ) и для ППД ( $Q, S, v$ ), то управляемых факторов в каждом случае – по три, но технологическая гибкость процесса ППД значительно выше: в этом случае всеми параметрами КПС (макро- и микрогеометрия, физико-механические свойства и др.) можно управлять в гораздо более широких пределах и более надёжно, чем при точении. Применение той или иной системы зачастую способствует формированию совершенно новых, не свойственных основному материалу детали, свойств.

Примером реализации системы повышенной гибкости является система обработки ППД программным способом (ППДПС) «торцевое фрезерование композитом 10 – ППД алмазное выглаживание (АВ) или накатывание шариком (НШ)» на фрезерном станке с ЧПУ, позволяющая программно управлять параметрами шероховатости  $R_{imp}$  предварительно обработанной поверхности, силой  $Q$  воздействия индентора на поверхность при обработке инструментами упругого действия программным перемещением по соответствующей координате и величиной подачи  $S$  инструмента. Это способствует формированию закономерно изменяемых параметров качества обрабатываемых поверхностей по заранее заданному закону [1, 3, 5].

Исследования таких ТС с ЧПУ по обеспечению заданных параметров качества обработки позволили получить следующие зависимости:

$$R_i = b_{0i} Ra_{np}^{b_{1i}} Q^{b_{2i}} S_{ППД}^{b_{3i}}, \quad (5)$$

где  $R_i$  – параметр качества ( $Ra, Rp, Sm$  и др.);  $b_{0i} \dots b_{3i}$  – коэффициенты.

Если  $R_i$  зад является функцией от длины обрабатываемой поверхности и для каждого участка  $x_i$  должна составлять определенную величину  $R_i(x_i)$ , то это достигается, например, за счёт изменения в процессе обработки ППД силы  $Q$ , определяемой из (5):

$$Q(x_i) = \left( \frac{1}{b_{0i} Ra_{np}^{b_{1i}} S^{b_{3i}}} \right)^{1/b_{2i}} \cdot R_{i\text{зад}}(x_i)^{1/b_{2i}}. \quad (6)$$

Возможно управление параметром  $R_i(x_i)$  за счёт технологической наследственности. В этом случае шероховатость предварительно обработанной поверхности на  $i$ -м участке должна составлять:

$$Ra_{np}(X_i) = \left( \frac{1}{b_{0i} Q^{b_{2i}} S^{b_{3i}}} \right)^{1/b_{1i}} \cdot R_{i\text{зад}}(X_i)^{1/b_{1i}}. \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) представляют собой законы для обеспечения программного управления параметром  $R_{i\text{зад}}$  (заданное значение) за счёт изменения силы воздействия индентора на обрабатываемую поверхность ( $Ra_{np}$ ,  $S = \text{const}$ ,  $Q = \text{var}$ ) и за счёт использования фактора технологической наследственности ( $R_{i\text{пр}} = \text{var}$ ,  $Q, S = \text{const}$ ).

В машиностроении распространена неоднородность воздействия внешних факторов в виде трапецеидального закона распределения нагрузок при эксплуатации и других эксплуатационных воздействий [4, 8]. В этом случае может оказаться эффективным трапецеидальный закон изменения силы при финишной обработке ППД плоских поверхностей типа направляющих скольжения.

В этом случае (рис. 5) типично наличие участков разбега  $X_1$ , стационарного воздействия внешних факторов  $X_2$  и торможения  $X_3$ . На этих участках соответственно должна изменяться и сила ППД  $Q$  при финишной обработке. При разработке и реализации программы, обеспечивающей трапецеидальную закономерность управления силой, а значит и качеством обработки при ППД, исходными данными наряду с параметрами  $X_1, X_2, X_3$  являются величины минимальной и максимальной силы ( $Q_{\min}, Q_{\max}$ ), жёсткости пружины инструмента ППД, величина подачи  $S$  и скорость обработки  $v$ .

Некоторые результаты обработки ППД методом алмазного выглаживания плоской поверхности с использованием закона (1) представлены на рис. 6. Их анализ показывает, что исследуемые параметры изменяются в широких пределах, что гарантирует возможность подготовки поверхности к неоднородным условиям эксплуатации, в частности, по параметрам износостойкости.

$$Y_{i1} = \left( \sum_{j=1}^{\mu} b_{1j} X_{1j} \right)_i; \dots; Y_{i\xi} = \left( \sum_{m=1}^{\xi} b_{\xi m} X_{\xi m} \right)_i; \dots; Y_{iq} = \left( \sum_{\zeta=1}^{\psi} b_{q\zeta} X_{q\zeta} \right)_i, \quad (11)$$

где  $Y_{i1}, \dots, Y_{iq}$  – это вклад подсистем технологического процесса  $ТС_1, \dots, ТС_q$  в формирование окончательного значения параметров качества  $Y_i$ .

Предполагается, что величина  $Y_{i1}, \dots, Y_{iq}$  должна иметь размерность  $Y_i$ .

Зависимость (8) можно представить в следующем виде:

$$Y_i = Y_{i0} \cdot K_1 \cdot \dots \cdot K_{\xi} \cdot \dots \cdot K_q, \quad (12)$$

где  $K_1, \dots, K_q$  – коэффициенты влияния соответствующих ТС:

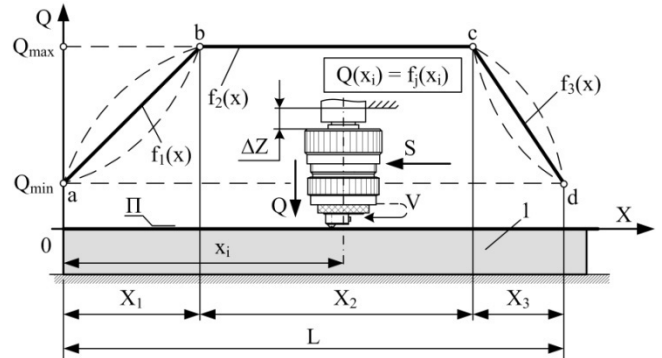


Рис. 5. Трапецеидальный закон изменения силы при обработке ППД плоских поверхностей деталей

С целью количественной оценки влияния технологической наследственности на формирование параметров качества в процессе обработки целесообразно применить метод имитационного моделирования. При этом логично использовать модели Кобба-Дугласа, так как расчёты по ним не дают отрицательных значений параметров, т.е. не нарушается физическая картина их формирования [2, 6]. Таким образом, для параметра качества  $Y_{i\xi}$ , формируемого на этапе эволюции поверхности в системе  $ТС_{\xi}$ , имитационная модель в общем случае имеет вид:

$$Y_i = Y_{i0} \cdot \prod_{j=1}^{\mu} X_{1j}^{b_{1j}} \cdot \dots \cdot \prod_{m=1}^{\xi} X_{\xi m}^{b_{\xi m}} \cdot \dots \cdot \prod_{\zeta=1}^{\psi} X_{q\zeta}^{b_{q\zeta}}. \quad (8)$$

Здесь  $Y_{i0}$  – среднее экспериментальное значение  $i$ -го параметра качества, которое имеет соответствующую размерность и определяется по результатам активного эксперимента;  $X_{\xi m}$  – параметр, численно равный значению  $m$ -го фактора обработки в  $ТС_{\xi}$ ;  $b_{\xi m}$  – показатель степени (1), соответствующий фактору обработки  $X_{\xi m}$ .

Для модели (8) соблюдается условие (9):

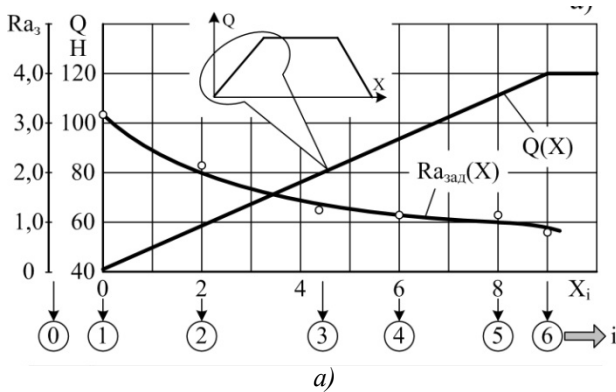
$$\mu + \xi + \psi = k, \quad (9)$$

где  $k$  – общее число учтённых факторов технологического процесса в плане активного эксперимента.

Исходя из этого, в общем случае имеем:

$$Y_i = Y_{i0} + Y_{i1} + \dots + Y_{i\xi} + \dots + Y_{iq}. \quad (10)$$

$$K_1 = \prod_{j=1}^{\mu} X_{1j}^{b_{1j}} ; \dots ; K_{\varepsilon} = \prod_{m=1}^{\xi} X_{\varepsilon m}^{b_{\varepsilon m}} ; \dots ; K_q = \prod_{\zeta=1}^{\psi} X_{q\zeta}^{b_{q\zeta}} \quad (13)$$



Q H	Ra мкм	Rp мкм	Rm мкм	$\rho_{cp}$ мм	b	v	$\Delta$	i
0	3,87	12,3	19,8	0,022	0,72	1,5	1,13	0
40	3,08	5,23	13,8	0,73	1,27	1,09	0,015	1
58	2,16	3,9	12,03	0,94	0,89	1,31	0,014	2
78	1,34	5,3	11,5	0,74	0,82	1,48	0,018	3
95	1,29	3,1	10,7	1,40	0,80	1,6	0,009	4
110	1,13	2,3	10,6	1,63	1,30	1,04	0,005	5
120	0,79	2,6	10,5	1,63	1,30	1,04	0,006	6

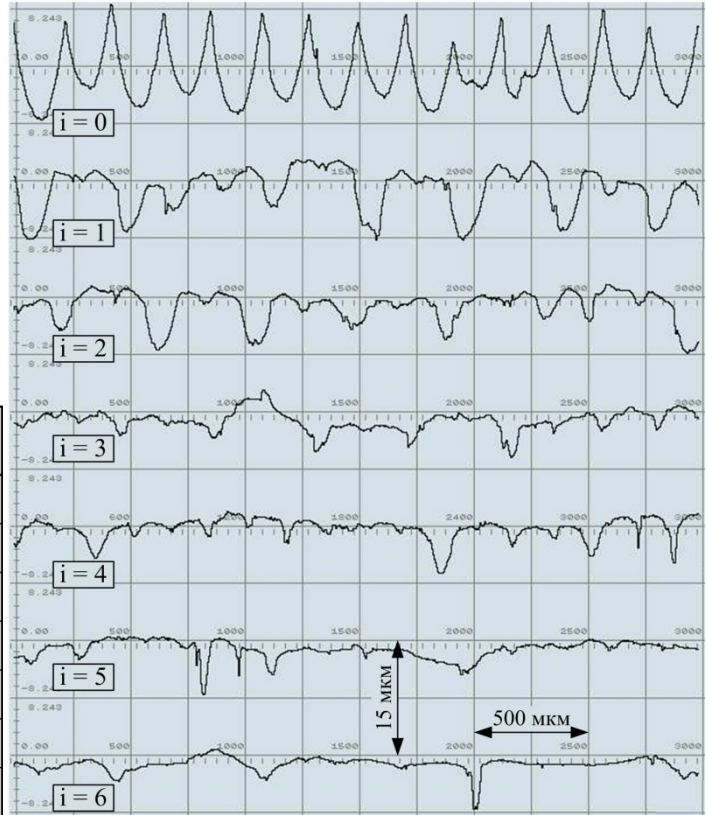


Рис. 6. Результаты управления параметрами микропрофиля плоской поверхности по заданному трапецидальному закону изменения нагрузки при алмазном выглаживании:

a – закон  $Q = f(x)$ ; б – типовые профилограммы; в – значения параметров микропрофиля

Таким образом, по значениям коэффициентов  $K_q$  можно судить о влиянии технологических подсистем, т.е. технологической наследственности на формирование исследуемых параметров качества. Коэффициент влияния  $K_q$  в общем случае можно представить в следующем виде:

$$K_q = k_{q1} \cdot k_{q2} \cdot \dots \cdot k_{q\psi}, \quad (14)$$

где  $\psi$  – число управляющих факторов технологической подсистемы  $ТС_q$ .

Предлагаемый подход к оценке влияния технологической наследственности позволяет дифференцированно решать вопросы выбора факторов обработки по величинам  $k_{q\psi}$  с целью эффективного управления регламентируемыми параметрами качества. Предпочтение при этом отдается факторам, имеющим более высокие значения  $k_{q\psi}$ .

Графическое представление влияния технологической наследственности на формирование параметров микропрофиля (рис. 7) показывает, что оно различно для каждого параметра и для разных точек области факторного пространства.

На основе проведенных исследований сформирована база данных значений коэффициентов влияния технологической наслед-

ственности на формирование параметров качества поверхности в ТС «торцевое фрезерование ПСТМ – АВ» для различных областей факторного пространства.

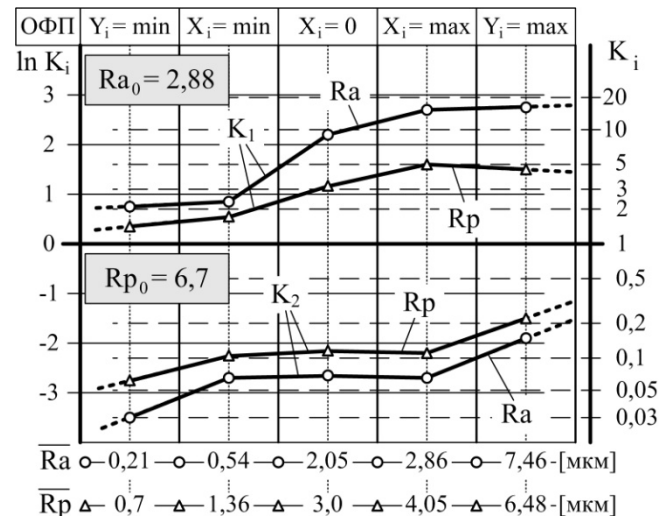


Рис. 7. Влияние технологической наследственности на формирование параметров микропрофиля Ra и Rp



Таким образом, на основе имитационного моделирования процессов формирования параметров качества поверхности на различных стадиях обработки предложен математический аппарат и методика количественной оценки влияния технологической наследственности.

Вопросы, методы, теоретические и практические подходы, изложенные в статье, могут служить основой инженерных методов технологического обеспечения равноизносности различных участков функциональных поверхностей деталей машин путем соответствующей регламентации законов изменения параметров шероховатости по поверхности в соответствии с конкретными условиями эксплуатации механической обработкой в гибких технологических системах.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Инженерия** поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Сулова – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. **Нагоркин, М.Н.** Параметрическая надёжность технологических систем чистовой и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин инструментами из сверхтвёрдых синтетических материалов: Монография / под ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 304 с.
3. **Нагоркин, М.Н., Федоров, В.П., Нагоркина, В.В., Ковалева, Е.В.** Параметрическая надёжность технологических систем лезвийной и упрочняющей обработки инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов по геометрическим параметрам качества и триботехническим характеристикам поверхностей деталей // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. Том VII. Коллективная монография / под ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2016. – С. 506-688.
4. **Нагоркин, М.Н., Федоров, В.П., Тотай, А.В.** Условия эксплуатации функциональных поверхностей трибоэлементов в типовых соединениях трения скольжения // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 6 (57). – С. 15-26.
5. **Сулов, А.Г., Федонин, О.Н., Польский, Е.А.** Научноёмкая технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2016. – №5 (59). – С. 34-42.
6. **Сулов, 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.

7. **Технологическое** обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Сулов, В.П. Федоров, О.А. Горленко [и др.]; под общ. ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение. 2006. – 447 с.

8. **Фёдоров, В.П., Нагоркин, М.Н., Ковалёва, Е.В., Чмыхов, Д.В.** Адаптация поверхностей трибоэлементов к нестационарным условиям эксплуатации обработкой ППД программным способом // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 10. – С. 9-15.

## REFERENCES

1. *Parts Surface Engineering* / Author group; under the editorship of A.G. Suslov – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.
2. Nagorkin, M.N. *Parametric Reliability of Finishing and Finish-Strengthening Technological Systems of Machinery Surface Machining with Super-Hard Synthetic Tools*: monograph / under the editorship of A.V. Kirichek. – M.: "Spectrum" Publishers, 2017. – pp. 304.
3. Nagorkin, M.N., Fyodorov, V.P., Nagorkina, V.V. Kovalyova, E.V. Parametric reliability of technological systems with super-hard synthetic tool edging and strengthening on geometric parameters of quality and tribo-technical characteristics of parts surface // *Efficient Mechanical Engineering Technologies, Equipment and Tools*. Vol. VII. Group monograph / under the editorship of A.V. Kirichek. M.: "Spectrum" Publishers, 2016. – pp. 506-688.
4. Nagorkin, M.I., Fyodorov, V.P., Totay, A.V. Operating conditions for fundamental surfaces of tribo-elements in standard sliding friction joints // *Proceedings of South-Western State University*. – 2014. – No.6 (57). – pp. 15-26.
5. Suslov, A.G., Fedonin, O.N., Polsky, E.A. Science intensive technology for quality increase of machinery assembly units at life stages // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.5 (59). – pp. 34-42.
6. Suslov, A.G., Fyodorov, V.P., Nagorkin, M.N., Pyrikov, I.L. Complex approach to experimental investigations of metal-working technological systems to support quality parameters and operating properties of machinery surfaces // *Science Intensive technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.10 (88). – pp. 3-13.
7. *Technological Support and Increase of Operating Properties 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.
8. Fyodorov, V.P., Nagorkin, M.N., Kovalyova, E.V., Chmykhov, D.V. Tribo-element surface adaptation to non-standard operation conditions with SPD processing by program method // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2007. – No.10. – pp. 9-15.

Рецензент д.т.н. А.О. Горленко

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 01.03.2019. Выход в свет 30.04.2019.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

12+

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16