

**В.П. Федоров, д.т.н., проф.**  
**М.Н. Нагоркин, к.т.н., доц.**  
**Е.В. Ковалева, к.т.н., доц.**

*Брянский государственный технический университет*

## **АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРИБОЭЛЕМЕНТОВ В ТИПОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ**

*В работе рассмотрены особенности эксплуатации функциональных поверхностей деталей в соединениях трения-скольжения машин и технологического оборудования и пространственно-временные модели силовых и скоростных факторов.*

***Ключевые слова:** функциональные поверхности деталей, силовые факторы, скоростные факторы.*

**Постановка проблемы.** Недостатком технологического обеспечения эксплуатационных свойств соединений до недавних пор являлось требование однородности качества контактирующих поверхностей, которое обуславливалось жесткостью 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 влечет 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. Эффект неравномерности "выработки" обусловлен взаимодействием однородности качества функциональных поверхностей с нестабильностью условий эксплуатации (нагрузки, скорости, временного фактора и др.). Результатом является потеря точности как одной из важнейших функций технологического оборудования и в лучшем случае – необходимость ремонта, а в худшем – его замены.

Для получения поверхностей с равномерными эксплуатационными свойствами рекомендуется 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.

**Изложение основного материала.** 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. Такие задачи можно обеспечить при чистовой и финишной обработке поверхностей в технологических системах с компьютерным управлением (CNC, HCNC и др.), которые обладают повышенной гибкостью, обеспечивая заданный закон неоднородности поверхности по качеству за счет возможности управления режимами в пределах перехода. В связи с этим рассчитываются логические модели управления и принципы технологического обеспечения заданных законов изменения параметров качества по обрабатываемой поверхности, а также структурная модель обеспечения качества поверхностей деталей машин для эксплуатации в неоднородных условиях с использованием систем с ЧПУ и персональных компьютеров. Знание особенностей эксплуатации функциональных поверхностей трибоэлементов необходимо для оптимизации их обработки с целью обеспечения максимальной наработки до отказа по критерию равномерной износостойкости соединения, что является важным для узлов технологического оборудования и оснастки. Типовыми соединениями трения скольжения являются цилиндрические подшипники скольжения, плоские и цилиндрические направляющие механизмов с различными видами движения трибоэлементов, соединения "кулачок-толкатель" кулачковых механизмов. Под функциональной поверхностью трибоэлемента понимается поверхность, контактирующая с аналогичной поверхностью другого трибоэлемента и воспринимающая внешние воздействия в процессе эксплуатации (давление, скорость относительного скольжения, смазка, температура и др.), которые необходимо учитывать при разработке технологического процесса обработки функциональных поверхностей.

Цилиндрический подшипник трения скольжения, трибоэлементами которого являются вал 1 и вкладыш 2, может работать по схемам: 1) вращается вал – вкладыш неподвижен (рис. 1, а); 2) вращается вкладыш – вал неподвижен (рис. 1, б).



Принципиальное отличие рассматриваемых схем заключается в том, что при подвижном вале, вращающемся с угловой скоростью  $\omega_1$ , его поверхность изнашивается равномерно по окружности, а поверхность вкладыша только в пределах  $\cup(ab)$ , длина которой зависит от  $\psi$ . Неподвижные точки поверхности вала, находящиеся в пределах  $\cup(ab)$ , постоянно контактируют с поверхностью вращающегося вкладыша, что определяет неравномерный износ вала, имеющий вид "выработки" по дуге  $\cup(ab)$  с центральным углом  $\psi$ .

Таким образом, имеющие одинаковое конструктивное исполнение трибоэлементы в двух рассмотренных случаях будут отличаться по эксплуатационным свойствам, в частности по характеру и величине износа.

При рассмотрении трибоэлементов в неподвижной системе координат  $XOZ$  (рис. 1), их можно классифицировать как: 1) базовый трибоэлемент (БТЭ) с постоянной ориентацией в выбранной системе координат (невозможность перемещения вдоль осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и вращения вокруг осей  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ ); 2) мобильный трибоэлемент (МТЭ), характеризующийся наличием одной или нескольких степеней подвижности.

Триботехнические характеристики МТЭ и БТЭ (величина износа, коэффициент трения и др.) определяются рядом технологических и эксплуатационных факторов (путь трения).

На рисунке 1, в представлены диаграммы процессов контактирования трибоэлементов, представляющие зависимость наличия (1) или отсутствия (0) контакта между элементарными точками поверхностей от угла поворота  $\varphi$  МТЭ. Здесь  $2\pi$  – один рабочий цикл МТЭ (1 оборот),  $N$  – общее число циклов (число оборотов МТЭ),  $L$  – путь, который проходит элементарная точка МТЭ при вращении с угловой скоростью  $\omega_1$  (или  $\omega_2$ ), т. е.

$L = 2\pi r N$ . Это максимально возможный путь трения для элементарной точки  $i$  поверхности трибоэлемента, находящейся в непрерывном контакте с поверхностью второго трибоэлемента, вращающегося с угловой скоростью  $\omega$  за  $N$  циклов.

Из диаграмм видно, что непрерывный контакт с сопряженной поверхностью 1 характерен для элементарных точек  $i$  поверхности БТЭ, принадлежащих дуге  $\cup(ab)$  с центральным углом  $\psi$ . Точки, принадлежащие  $\cup(ab)$  с углом  $(2\pi - \psi)$ , в зону контакта не входят (0). В случае I – это вкладыш, в случае II – вал. Элементарные точки МТЭ периодически контактируют с поверхностью БТЭ, причем длительность контакта определяется длиной дуги  $\cup(ab)$  и угловой скоростью  $\omega$ , а путь трения за один цикл составляет длину  $\cup(ab)$ , тогда общий путь трения элементарной точки МТЭ за  $N$  циклов составит  $L_{MTЭ} = l_{\cup(ab)}N = r\psi N$  при ли-

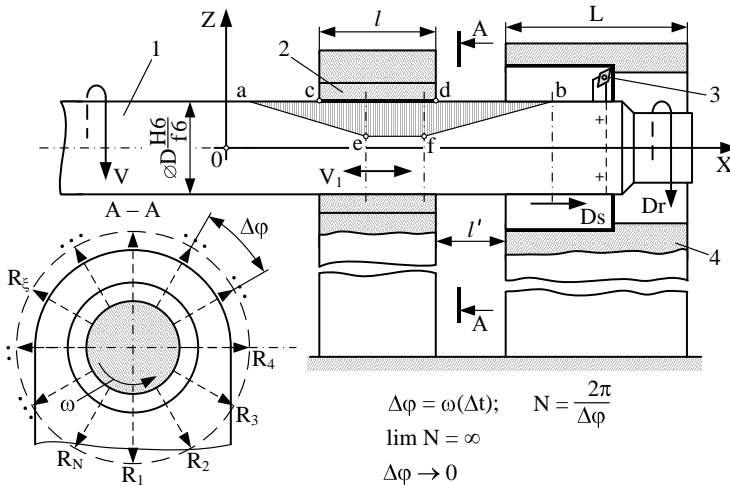
нейной скорости относительного скольжения  $V = \omega r$ .

Для рассмотрения триботехнической системы "подшипник скольжения" путь трения элементарных точек радиального сечения поверхности за  $N$  циклов работы (число оборотов) значительно меньше пути соответствующих точек (участвующих в контакте) базового трибоэлемента в  $(2\pi/\psi)$  раза. Кроме этого, поверхность МТЭ подвержена равномерному изнашиванию, а для БТЭ характерна так называемая "выработка" (местное изнашивание).

В технологических системах широко применяются цилиндрические опоры трения скольжения одновременно вращательного и возвратно-поступательного движения (рис. 2), например задняя и передняя направляющие инструмента для обработки отверстий в заготовках на расточных станках и автоматических линиях.

Корпус борштанги 1 является мобильным трибоэлементом 2-го рода, так как в неподвижной системе координат  $XOZ$  имеет две степени подвижности: вращение со скоростью  $V$  вокруг оси  $OX$  и перемещение вдоль оси  $OZ$  со скоростью подачи  $D_s$ . Вкладыш 2 задней направляющей является БТЭ. Особенность этой трибосистемы – вращение вектора реакции опоры 2 (вкладыша)  $R_i$  вокруг оси с угловой скоростью  $\omega = 2V/D$ , в соответствии с положением в каждый момент времени резцового блока 3 при обработке заготовки 4. Это обстоятельство гарантирует равномерный контакт всех точек вкладыша (а, значит, и его равномерный износ) с поверхностью МТЭ-2 – корпусом борштанги.

Диаграмма продолжительности контакта точек поверхности корпуса 1 с поверхностью вкладыша 2 представляет собой трапецию  $ae\bar{f}b$ , длины оснований которой  $ab$  и  $ef$  зависят от соотношения размеров  $l$ ,  $l'$  и  $L$ . Участок  $ef$  ограничивает зону поверхности корпуса борштанги, все точки которой имеют максимальную продолжительность контакта с вкладышем за 1 цикл работы, так как проходят участок  $cd = l$  полностью 2 раза (рабочий и холостой ход).



*Рис. 2. Модель опоры трения скольжения задней направляющей борштанги при обработке отверстий: 1 – корпус борштанги (МТЭ); 2 – вкладыш подшипника скольжения (БТЭ); 3 – расточной блок; 4 – заготовка*

Со стороны вкладыша создается максимальное давление на корпус борштанги, которое всегда противоположно положению режущего блока, поэтому процесс изнашивания будет не симметричным, а одно-сторонним. Эти особенности необходимо учитывать при изготовлении корпуса 1, чтобы обеспечить его равномерный износ и, следовательно, стабильность точности обработки деталей 4 (рис. 2).

Широкое распространение в технологии машиностроения получили цилиндрические направляющие трения скольжения возвратно-поступательного движения (рис. 3).

Скалка 1 является БТЭ в случае, представленном на рисунке 3, а. Мобильный трибоэлемент (МТЭ) 2 в этом случае может иметь как одну ( $V_1$ ), так и две ( $V_1$  и  $V$ ) степени подвижности. Рисунок 3, б иллюстрирует случай, когда мобильным трибоэлементом является скалка 1, которая совершает лишь возвратно-поступательное движение относительно вкладыша 2 (БТЭ). Такие схемы весьма характерны для скалчатых кондукторов и направляющих элементов оснастки в автоматических линиях при обработке отверстий.

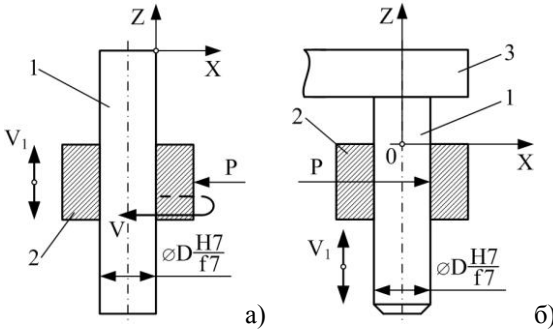


Рис. 3. Схемы трибосистем цилиндрических направляющих трения скольжения возвратно-поступательного движения

Для этих случаев при любых условиях эксплуатации наибольшей интенсивностью отличается процесс контактирования поверхности вкладыша 2, элементарные точки которой находятся в непрерывном контакте с поверхностью скалки 1. Диаграмму продолжительности контакта для элементарных точек поверхности скалки 1 можно без труда построить аналогично рисунку 2, зная технологические параметры работы приспособления (скальчатый кондуктор) или соответствующей позиции автоматической линии. В последнем случае цикл работы отличается высокой ритмичностью.

На рисунке 4 представлена схема триботехнической системы опоры

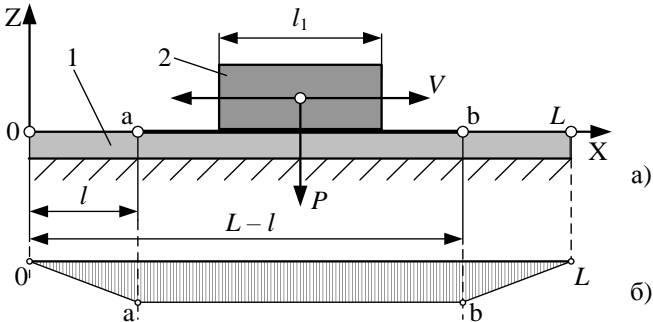


Рис. 4. Схема триботехнической системы опоры трения скольжения прямолнейных плоских направляющих (а) и эюра интенсивности контактного взаимодействия для элементов поверхности БТЭ (б)

ры трения скольжения плоских направляющих, к которым относятся направляющие станин металлорежущих станков, технологической оснастки и др. Формы поверхностей трения могут быть самыми различными, что определяется назначением и технологическими особенностями оборудования.

В таких парах трения МТЭ 1 совершает возвратно-поступательное движение относительно БТЭ 2, которым является в большинстве случаев станина. Определение действующей нагрузки  $P$  является при заданных конструктивно-технологических особенностях МТЭ 1 (суппорта, каретки и др. элементов) одной из типовых задач теоретической механики.

При возвратно-поступательном движении МТЭ 1 в пределах от 0 до  $L$  наиболее нагруженными элементарными точками направляющей (БТЭ 2) являются те, которые находятся в пределах отрезка  $ab$  (рис. 4, б). В то же время все точки функциональной поверхности МТЭ 1 находятся в непрерывном контакте с поверхностью БТЭ 2.

Диаграмма продолжительности контакта элементарных точек БТЭ с поверхностью МТЭ представляет собой трапецию  $0abL$ , аналогичную ранее рассмотренной (рис. 2). Отрезку  $ab$  принадлежат наиболее нагруженные точки БТЭ, то есть основания 2 (станины).

Представленный анализ показывает, что для обеспечения равномерного износа направляющих элементов технологического оборудования и оснастки при разработке технологии обработки функциональных поверхностей деталей необходимо учитывать особенности воздействия на них эксплуатационных факторов, в частности нагрузки, формировать соответствующие параметры их качества программным способом в процессе обработки.

Анализ работ по технологическому обеспечению износостойкости трибозащелки показывает, что нередко авторы рассматривают параметры эксплуатации ( $P$  – давление на единицу площади проекции опорной поверхности;  $V$  – скорость относительного скольжения трибозащелки) 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.

Временные зависимости для нагрузки  $P$  на трибосистему можно



охарактеризовать следующими случаями (рис. 5).

*Случай 1.* Нагрузка  $P$  постоянна во времени ( $P = P_0 = \text{const}$ ). В этом случае производная  $dP/dt = 0$ . Это наиболее простой идеальный случай.

*Случай 2.* Нагрузка  $P$ , изменяющаяся по синусоидальному закону  $P = P_0 + \Delta p \sin \omega t$ , где  $P_0$  – номинальное значение нагрузки;  $\Delta p$  – ее амплитудное значение;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота ( $f$  – частота в герцах).

Технологическое обеспечение триботехнических характеристик для этого случая рассмотрено в работах [2 и др.].

*Случай 3.* Нагрузка  $P$  имеет импульсивный характер, оцениваемый величинами:  $P_0, P_m$  – минимальное и максимальное значение нагрузки;  $T, \tau$  – период и длительность импульса;  $c = T/\tau$  – скважность импульса.

*Случай 4.* Нагрузка  $P$  изменяется от нуля до номинального значения  $P_0$  по закону треугольника с периодом  $T$  и длительностью импульса  $\tau$ . Скважность определяется величиной  $c = T/\tau$  и нагрузка приближается к идеальной ударной при  $\tau \rightarrow 0$ .

*Случай 5.* Случай трапецидального закона изменения нагрузки  $P$ , которая может принимать значение от  $P_1$  ( $P = P_1 = \text{min}$ ) до  $P_0$ . с периодом  $T_p$ . Можно выделить четыре фазы воздействия на номинальную площадь контакта поверхностей трибоэлементов:  $t_n$  – время нагружения от  $P_0$  до  $P$ ;  $t_m$  – время воздействия максимальной нагрузки  $P = P_0$ ;  $t_p$  – время разгрузки от  $P_0$  до  $P_1$ ;  $t_s$  – время выстоя соединения под нагрузкой  $P_1$ .

*Случай 6.* Нагрузка  $P$  принимает значения от  $P_1$  до  $P_0$  в детерминированных временных интервалах  $t_n, t_m, t_p, t_s$ , аналогичных рассмотренным в случае 5. Отличительная особенность этого случая – непостоянство производной функции нагрузки от времени в пределах каждого из отмеченных временных интервалов, то есть  $dP/dt = \text{const}$ . Теоретически в этом случае, как и в предыдущем, можно допустить, что  $P_1 = 0$ .

*Случай 7.* Нагрузка  $P$  представляет собой стационарную случайную функцию от времени. Ее математическое ожидание  $M\{P\}$  соответствует номинальному значению  $P_0$ . Величина  $\sigma_p$  – среднее квадратичное отклонение сечения ансамбля реализаций в момент времени  $t_i$ . Такой закон изменения нагрузки во времени является наиболее общим для стационарных условий, так как в процессе эксплуатации соединений всегда имеют место случайные факторы, изменяющие величины нагрузки [3].

*Случай 8.* Математическое ожидание нагрузки является функцией времени, то есть зависимость нагрузки от времени является нестационарным случайным процессом. В этом случае параметры нагрузки,

являющиеся характеристиками нестационарного случайного процесса, можно определить только осреднением мгновенных значений по ансамблю выборочных функций, формирующих процесс [3].

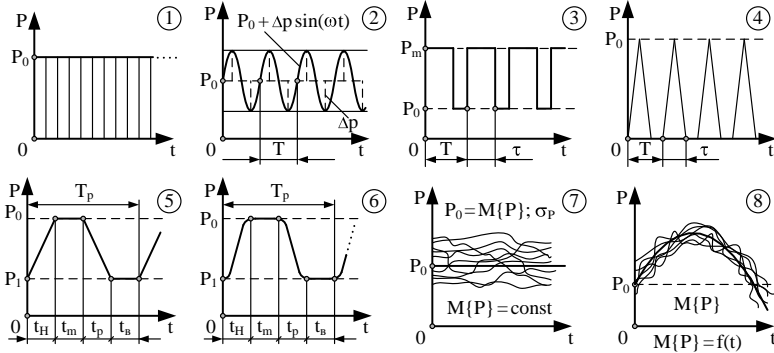


Рис. 5. Законы изменения нагрузки  $P$  на трибосистему во временной области

Характерные законы изменения скорости относительного скольжения трибоземента во временной области показаны на рис. 6 и характеризуются следующим образом.

*Случай 1.* Скорость постоянна, ускорение равно нулю, то есть  $\omega = \text{const}$ ,  $d\omega/dt = 0$  и  $V = (\omega D/2) = \text{const}$ . Это наиболее простой случай, аналогичный для нагрузки  $P_1$ .

*Случай 2.* Изменение скорости  $V$  во времени протекает по трапецидальному закону от величины  $V_1 = V_{\min}$  до  $V_0 = V_{\max}$  с периодом  $T_v$ . Как в случае 5 для нагрузки (рис. 5) для скорости  $V$  характерны четыре фазы воздействия на трибосистему:  $t_1$  – время для разгона от величины  $V_1$  до  $V_0$  (скорость  $V_0$  достигается в период пуска длительностью  $t_0$ , который на схеме не показан);  $t_2$  – время работы трибосистемы на максимальной скорости  $V_0$ ;  $t_3$  – время замедления скорости от  $V_0$  до  $V_1$ ;  $t_4$  – время работы при минимальной скорости  $V_1$ . Если  $V_1 = 0$ , то работа соединения происходит в режиме "старт–стоп" и в этом случае  $t_0 = 0$ , а время  $t_4$  представляет собой время выстоя (длительность остановки).

*Случай 3.* Отличие данного закона от трапецидального заключается в том, что в периоды времени  $t_1, t_2$  зависимость скорости от времени отличается от прямолинейной, то есть если в случае 2 ускорение на этих участках было постоянным и отличным от 0 ( $d\omega/dt = \text{const} \neq 0$ ), то в этом случае  $d\omega/dt = \text{Var}$  (работа с переменным угловым ускорением). Как и в предыдущем случае, при  $V_1 = 0$  трибосистема работает в режи-

ме "старт-стоп" со временем выстоя  $t_4$ .

Случай 4. Величина скорости представляет собой стационарную случайную функцию времени с математическим ожиданием  $V_0 = M\{V\}$  и дисперсией  $D\{V\}$  [3].

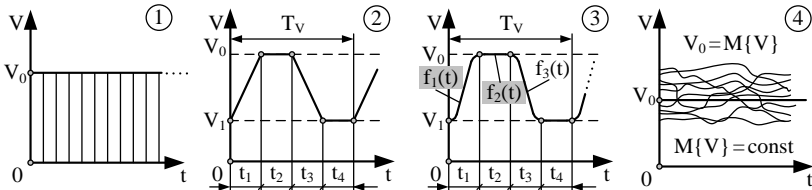


Рис. 6. Законы изменения скорости относительного скольжения  $V$  трибоэлементов во временной области

Наиболее общим законом изменения нагрузки  $P$  в пространственной области является трапецеидальный (случай P1, рис. 7), 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.

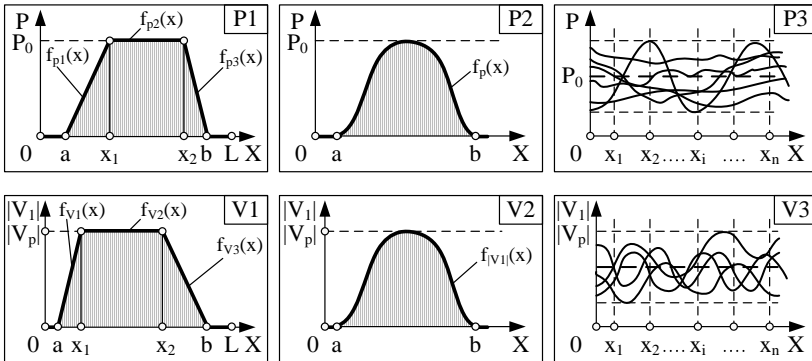


Рис. 7. Типовые законы изменения нагрузки  $P$  и скорости относительного скольжения  $V$  в пространственной области для пар трения типа направляющих скольжения

Более простым в этом плане является случай P2 (рис. 7), когда за-

висимость  $f_p(x)$  является непрерывной дифференцируемой функцией, имеющей общее аналитическое описание.

Случай P3 (рис. 7) – это зависимость нагрузки  $P$  в виде стационарного случайного процесса в функции координаты  $X$ . Она аналогична рассмотренной стационарной случайной функции от времени (случай 7, рис. 5).

При рассмотрении скорости  $V$  относительного скольжения трибоэлементов следует иметь в виду ее абсолютное значение, так как специфика работы направляющих скольжения технологического оборудования и других машин определяет ее знакопеременность. Наиболее общим также является трапецидальный закон зависимости скорости мобильного трибоэлемента от координаты рассматриваемой точки базового трибоэлемента (случай V1, рис. 7). Схема отражает 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 (рис. 7) 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. 7), что характерно при движении трибосистем на малых скоростях, когда возможны случаи торможения и ускорения, например, в связи с процессами схватывания.

Влияние технологических факторов обработки на триботехнические характеристики пары трения сказываются через размерные параметры сопряжения, например через формируемый зазор ( $\delta = D - d$ ), геометрические параметры качества поверхностей мобильного и базового трибоэлементов  $R$ ,  $W$ ,  $H$  (шероховатость, волнистость и макроотклонения) и физико-механические свойства  $H_\mu$ ,  $\sigma$  (микротвердость и остаточная напряженность). Материалы вала  $M_1$  и вкладыша  $M_2$ , а также покрытия  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  (материал, количество слоев, способы нанесения, параметры и др.) можно отнести к конструкторским или конструкторско-технологическим факторам. Эти характеристики в комплексе с внешними факторами эксплуатации определяют характер контактного взаимодействия при граничном трении, а значит и триботехнические характеристики: время  $t_0$  и путь приработки  $L_{01}$ ,  $L_{02}$ , величины начального износа  $h_{01}$ ,  $h_{02}$ , коэффициент трения в начале  $f_1$  и в конце  $f_0$  приработки, величину контактной податливости соединения, определяющую точность технологического оборудования и оснастки и др.

Обобщенная пространственно-временная эпюра внешних возмущающих воздействий на соединения трибозащитных элементов (складывается из 4-х участков (рис. 8, а)) представляет собой зависимости нагрузки ( $Y = P$ ) или скорости относительного скольжения ( $Y = V$ ) от времени работы ( $X = t$ ) или координаты поверхности ( $X = Z$ ). Таким образом, она является характерной для четырех зависимостей, имеющих место на практике:  $P = f(t)$ ;  $P = f(L)$ ;  $V = f(t)$ ;  $V = f(Z)$ .

По оси абсцисс обобщенная эпюра имеет четыре характерных участка (рис. 8, а).

*Участок 1:*  $0x_a = X_1$  – участок нагружения (для  $P$ ) или разгона (для  $V$ ) длиной  $X_1$  до достижения соответствующих значений  $Y = Y_0$ . Нагружение или разгон могут осуществляться как от  $Y = 0$ , так и от какой-то исходной величины  $Y = Y_0$ . В общем случае аналитическая зависимость для участка  $0x_a$  активации величины  $Y$  имеет вид непрерывной возрастающей функции  $Y = f_1(x)$ .

*Участок 2:*  $x_ax_b = X_2$  – участок номинальных возмущающих воздействий, подчиняющихся закону  $Y = f_2(x)$ , вид которого зависит от особенностей и условий эксплуатации конкретной трибосистемы.

*Участок 3:*  $x_bx_c = X_3$  – участок разгрузки (для  $Y = P$ ) или замедления ( $Y = V$ ), где имеет место закон  $Y = f_3(x)$ , отличающийся снижением величины  $Y$  от  $Y_0$  до  $Y_1$  или до 0.

*Участок 4:*  $x_cx_d$  – участок выбега, характерный воздействием минимальной нагрузки или скорости относительного движения в трибосистеме. Как правило, величина  $Y$  в пределах этого участка подчиняется закону  $Y = f_4(x) = Y_1 = \text{const}$ .

Обобщенная эпюра имеет период  $T = X_1 + X_2 + X_3 + X_4$ , причем длительность отдельных составляющих периода может быть равной нулю.

В зависимости от этого, а также от вида функций  $f_1(x), \dots, f_4(x)$  обобщенная эпюра возмущающих воздействий вырождается в частные, некоторые из которых показаны на рисунке 8, б.

Так, при  $X_1 = X_3 = X_4 = 0$  ( $T = X_2$ ) и  $f_2 = Y_0 = \text{const}$  наблюдается постоянное стабильное возмущающее воздействие  $P = Y_0 = \text{const}$  (или  $V = Y_0 = \text{const}$ ) как во временной ( $t$ ), так и в пространственной ( $Z$ ) областях (1, рис. 8, б).

Импульсный характер возмущающих воздействий (2, рис. 8, б) наблюдается при условиях, если  $X_3 = X_4 = 0$ ;  $f_2(x) = Y(x) = Y_0$ , если  $X \in ((i - 1)T; (i - 1)T + \tau)$ ,  $i = 1, N$ ; или  $f_2(x) = Y(x) = Y_1$ , если  $X \notin ((i - 1)T; (i - 1)T + \tau)$ ,  $i = 1, N$ .

При  $Y_1 = 0$  получается классическое импульсное воздействие со

скважностью импульса  $c = T/\tau$  (3, рис. 8, б).

Широко распространенный синусоидальный закон изменения внешних возмущающих воздействий (4, рис. 8, б), принятый при исследованиях динамики трибосистем наблюдается при условиях:  $X_1 = X_3 = X_4 = 0$ ;  $f_2(x) = Y(x)$ .

Величины  $Y_0$ ,  $\Delta Y$  и  $T$  задаются в исходных данных при проведении исследований или определяются, исходя из реальных условий эксплуатации.

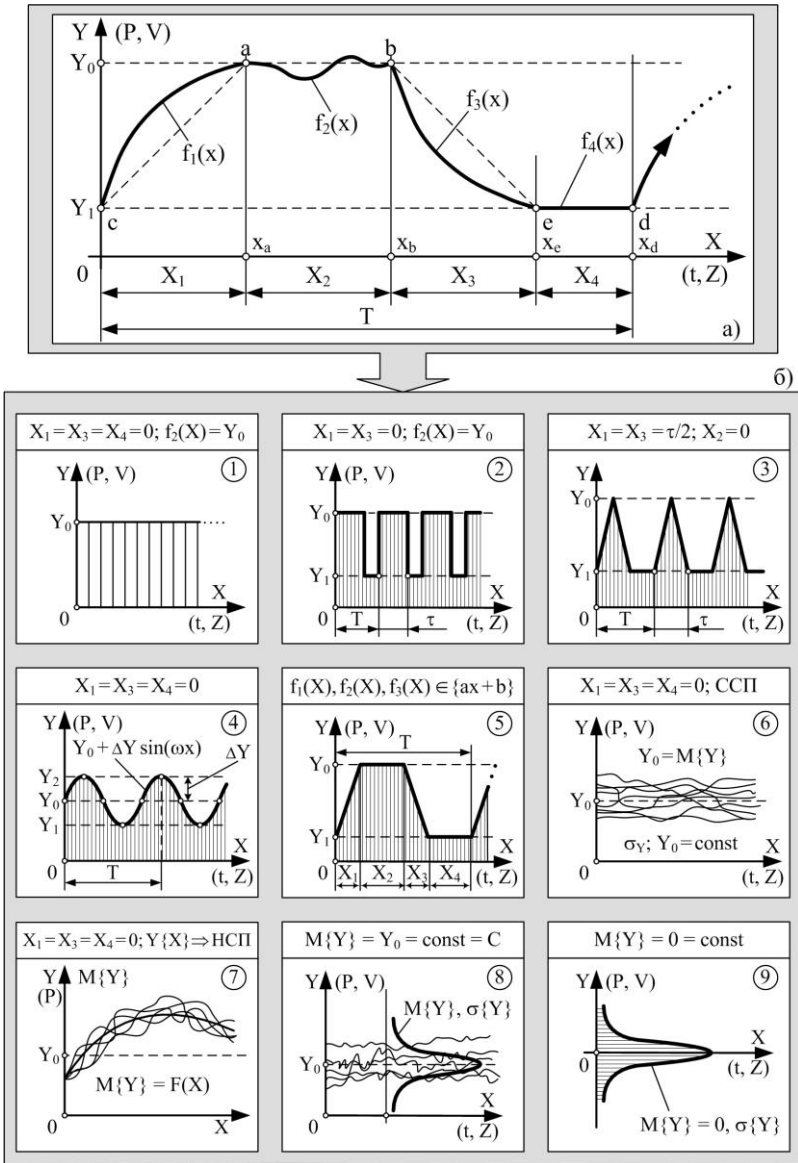


Рис. 8. Этюры распределения внешних воздействий на триботехнические системы в пространственно-временной области: а – обобщенная этюра; б – типовые случаи вырождения обобщенной этюры в частные

Обобщением постоянного стабильного возмущающего воздействия (1, рис. 8, б) является случай, когда  $X_1 = X_3 = X_4 = 0$ , а на протяжении  $X_2$  функция  $Y(x_2) = f_2(x)$  представляет собой стационарный случайный процесс, обладающий эргодическим свойством. Он имеет математическое ожидание  $M\{Y\} = Y_0$  и дисперсию  $\sigma^2\{Y\}$ . Такой случай (6, рис. 8, б) является наиболее характерным для реальных условий, и он наблюдается как для нагрузок, так и для скоростей относительного скольжения [1].

Наиболее общим является трапецеидальный закон приложения внешних возмущающих воздействий (5, рис. 8, б). Для него характерно наличие всех четырех составляющих  $X_1, X_2, X_3, X_4$  периода  $T$ . При допущении, что функции  $f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)$  линейны, такой закон выполняется при следующих условиях:  $f_1(x), f_2(x), f_3(x) \in R(a_i + b_i x), i = 1 \dots 3; X_1 > 0; X_2 > 0; X_3 > 0; X_4 > 0; f_4(x) = Y = \text{const}$ .

Этот закон является простой и в то же время достаточно обобщающей моделью реально действующих возмущений как силового, так и скоростного характера.

Определенный интерес представляет определение обобщенного параметра  $pV$  в стационарных областях функционирования трибологической системы  $X_2 = X_b + X_a$  и  $X_4 = X_d + X_c$  (в том случае, если  $Y_p = 0$ ). В этом случае можно выделить из рассмотренных (рис. 8) три типовых эпоры зависимости факторов  $P$  и  $V$  от пространственно-временных координат  $X$  ( $Z$  или  $t$ ):

1 – возмущающие воздействия отличаются постоянством и стабильностью (идеальный случай);

4 – эпора возмущающих воздействий моделируется в виде синусоиды (или суммы синусоид), имеющих переменный, но детерминированный характер;

8 – возмущающие воздействия носят случайный характер, представляя собой реализации стационарного случайного процесса для каждого рассматриваемого цикла и имеющие математическое ожидание  $M\{Y\}$  и дисперсию  $D\{Y\}$ , не зависящие от  $X$ .

К этим трем типовым эпорам предлагается ввести эпору 9 – случайного возмущения, представляющего собой стационарный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием  $M\{Y\} = 0$  и дисперсией  $D\{Y\}$ .

Введение вспомогательной эпоры D позволяет упростить описание механизма формирования возмущений случайного характера. Так, эпору 8 можно представить суммой эпор 1 и 4, а процесс  $Y = [Y_0 + \Delta Y \sin(\omega x)]$  с эпорой 9 является математической моделью случайного воз-



мущения с изменяемым по закону синуса математическим ожиданием, имеющим амплитуду  $\Delta Y = Y_0$ .

**Вывод.** Результаты пространственно-временного моделирования силовых и скоростных факторов в парах трения скольжения деталей машин и технологического оборудования показывают, что существуют как простые, так и сложные модели их распределения по поверхности контактирования трибозащитных элементов. Это говорит о том, что эксплуатационные свойства поверхности со стационарным (стабильным) качеством будут нестационарны в функции ее координат. Следовательно, для обеспечения стационарности эксплуатационных свойств в координатах функциональной поверхности необходимо обеспечивать параметры ее качества по закону, соответствующему конкретной модели действующих силовых и скоростных факторов. Этого можно достичь программным управлением формирования параметров качества поверхностного слоя по заданному закону в процессе обработки.

#### Список использованной литературы:

1. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол : пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 540 с.
2. Федоров В.П. Технологические и метрологические аспекты адаптации поверхностей деталей машин к нестационарным условиям эксплуатации в процессе изготовления / В.П. Федоров, М.Н. Нагоркин, И.Л. Пыриков // Справочник. Инженерный журнал. – № 10. – 2009. – С. 8–15.
3. Федоров В.П. Технологическое обеспечение закономерного изменения параметров качества поверхности детали в процессе обработки : монография / В.П. Федоров, М.Н. Нагоркин, Е.В. Ковалева. – Брянск : БГТУ, 2012. – 192 с.

ФЕДОРОВ Владимир Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры "Технология машиностроения" Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

– параметрическая надежность технологических систем.

Тел.: (4832) 58–82–20.

НАГОРКИН Максим Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры "Безопасность жизнедеятельности и химия" Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

– надежность технологического обеспечения параметров качества деталей машин.

Тел.: (4832) 58–82–34.

E-mail: [nagorkin@tu-bryansk.ru](mailto:nagorkin@tu-bryansk.ru).

КОВАЛЕВА Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры "Машиностроение и материаловедение" Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

– надежность технологического обеспечения параметров качества деталей машин.

Тел.: (4832) 56–14–01.

Статья поступила в редакцию

**Федоров В.П., Нагоркин М.М., Ковалева О.В.** Аналіз умов експлуатації функціональних поверхонь трибоелементів у типових з'єднаннях тертя ковзання

**Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Ковалева Е.В.** Анализ условий эксплуатации функциональных поверхностей трибоэлементов в типовых соединениях трения скольжения

**Fedorov V.P., Nagorkin M.N., Kovaljova E.V.** Analysis of the operating conditions of functional surfaces in the model compounds triboelementov friction

УДК 621-2.002.2

**Аналіз умов експлуатації функціональних поверхонь трибоелементів у типових з'єднаннях тертя ковзання / В.П. Федоров, М.М. Нагоркин, О.В. Ковалева**

Розглянуто особливості експлуатації функціональних поверхонь деталей в з'єднаннях тертя–ковзання машин і технологічного обладнання та просторово-часові моделі силових і швидкісних факторів.

**Ключові слова:** функціональні поверхні деталей, силові фактори, швидкісні фактори

УДК 621-2.002.2

**Analysis of the operating conditions of functional surfaces in the model compounds triboelementov friction / V.P. Fedorov, M.N. Nagorkin, E.V. Kovaljova**

The paper discusses the operational features of functional surfaces of the parts in the compounds of the friction-slip machines and technological equipment and spatial-temporal models of power and speed factors.

**Keywords:** functional surfaces of parts, power factors, speed factors