

## **Abstract**

An approach to the processes of development, creation and implementation of rosoil lubricants is shown. A brief description of methods and equipment for testing cutting fluids, lubricants and technological media with special properties used in metalworking processes, in the conservation of metal products and in machine parts assemblies is given.

*Keywords:* metalworking, Rosoil lubricants, test methods, laboratory equipment.

УДК 621.2.082.18

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-239

В.П. Тихомиров, М.А. Измеров, М.Г. Шалыгин  
Брянский государственный технический университет,  
Брянск, Россия, m.izmerov@yandex.ru

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С ЗАДАНЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

### **Аннотация**

В работе рассмотрены вопросы обеспечения заданных эксплуатационных свойств пар трения путём создания требуемой микрогеометрии поверхности, полученной с помощью моделирования поведения трибосистемы на основе фрактальных моделей инженерных поверхностей. Связь вида технологической обработки с требуемым качеством поверхности обеспечивается за счёт реализации заданной опорной кривой Аббота с помощью выбранного метода изготовления.

*Ключевые слова:* фрактальная размерность, опорная кривая, моделирование поверхностей, качество поверхности.

### **Введение**

Анализ и моделирование рельефа инженерных поверхностей в нано- и микро-масштабе, изготовленных с помощью разных видов технологической обработки, имеют множество важных применений, в том числе прогнозирование поведения трибосистем. Топография этих поверхностей может быть довольно эффективно охарактеризована, по существу, двумя фрактальными параметрами: фрактальной размерностью и параметром (амплитудой) фрактальной шероховатости. Разработанная модель фрактальной геометрии для изотропных поверхностей позволяет найти опорную площадь поверхности и использовать ее при оценке несущей площади поверхности. Фрактальная модель служит универсальным инструментом при моделировании рельефа поверхности, а анализ морфологии микрогеометрии играет важную роль в функциональных характеристиках контактной поверхности деталей машин.

Установленные в более ранних работах аналитические зависимости таких эксплуатационных показателей, как, например, контактная жесткость, герметичность уплотнительного устройства и т.п. содержат фрактальные показатели, но они не находят отражение в рабочей документации изделий. Более того, некоторые исследователи считают, что некоторые статистические показатели (например, асимметрия  $R_{sk}$ , эксцесс  $R_{ku}$ ) и фрактальная размерность  $D$  кажутся некоррелированными во всем диапазоне изменения условий технологии

изготовления и нечувствительны к факторам процесса обработки. Однако они соответствуют существенным качественным характеристикам текстуры поверхности и могут составлять репрезентативный набор морфологических или функционально ориентированных параметров. Для проверки этого утверждения требуется больше доказательств с точки зрения более широкого варьирования параметрами обработки и материалами обрабатываемой детали. Для того, чтобы изготавливать детали с определенными требованиями к шероховатости поверхности необходимо использовать небольшое количество некоторых параметров, совокупность которых достаточно полно выделяют заданную поверхность из других.

В качестве комплексного параметра в настоящей работе предлагается опорная кривая, которая служит в качестве сравнительного критерия, позволяющего производить правильный выбор параметров технологического процесса обработки поверхности. Изменения формы опорных кривых тесно связаны с технологией обработки поверхности, механикой контакта и характером изнашивания обработанных поверхностей. Описание опорных кривых набором параметров  $R_k$  и углом наклона средней части кривой Аббота, представляемой прямой линией, определенных в стандарте ISO 13565-2:1996, обеспечивает адекватное описание важнейших участков результирующего профиля поверхности в зависимости от условий обработки.

### Моделирование фрактальных поверхностей

Фрактальные поверхности характеризуются тем, что на разном уровне сечения поверхности от плоскости выступов фрактальная размерность постоянна, и структурные особенности профиля повторяют себя в разных масштабах. Таким образом, фрактальные свойства поверхности практически сохраняются до определенной глубины сближения поверхностей (практически до средней плоскости). Верхняя часть выступов микрорельефа играет важную роль при решении задач контактного взаимодействия и при оценке несущей способности поверхности, а опорная кривая Аббота характеризует распределение материала в поверхностном слое.

Модель фрактальной поверхности может быть представлена следующим выражением (по Потапову А.А.):

$$Z(x, y) = c_z \sum_{n=0}^{N-1} q^{(D_s-3)n} \sum_{m=1}^M \sin \left\{ K q^n \left[ x \cos \left( \frac{2\pi m}{M} \right) + y \sin \left( \frac{2\pi m}{N} \right) \right] + \theta_{nm} \right\}$$

Здесь  $c_z$  – множитель,  $q$  – параметр пространственно-частотного масштабирования,  $K$  – основное пространственное волновое число,  $M$  и  $N$  – число гармоник по соответствующим осям, а  $\theta_{nm}$  – случайная фаза, распределенная равномерно в интервале  $[-\pi, +\pi]$ . На рис. 1 представлена модель поверхности, построенная в разработанной авторами программе [5] при следующих данных:  $q = 2,7$ ;  $K = 0,1$ ;  $N = M = 3$ ;  $D_s = 2,17$  ( $D_s = D + 1$ ).

Результатом моделирования является представление модели поверхности в виде файла - карты (\*.map), которая характеризуется параметрами шероховатости по ГОСТ 2789-73, включая основные фрактальные параметры.

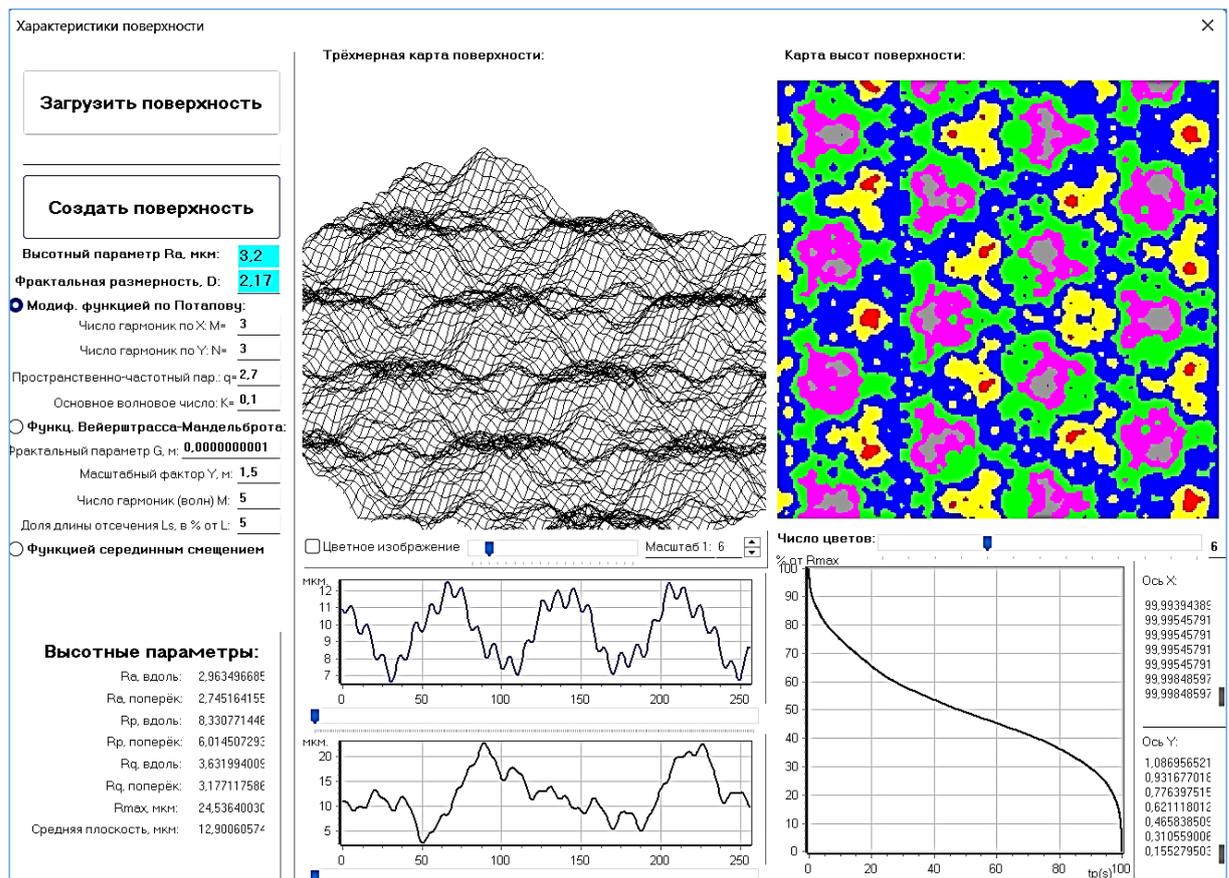


Рис. 1. Моделирование фрактальной поверхности

### Оценка влияния фрактальных параметров

Целью проектирования является определение параметров поверхности, обеспечивающие заданные эксплуатационные свойства изделия. В качестве эксплуатационного свойства рассмотрим контактную жесткость соединения деталей машин при малых нагрузках. Оценка контактной жесткости базируется на использовании принципов взаимодействия фрактальных поверхностей, изложенных в работе [1]. При этом полагаем, что известны свойства материалов соединения и контактная нагрузка. При условии, что критическая площадь пятна контакта, соответствующая переходу от пластического состояния к упругому, равна нулю, запишем контактную нормальную жесткость стыка в виде [2]:

$$K_n = \left[ \frac{4DE'(3-D)}{3\pi(2-D)(1-D)\psi^{1-\frac{D}{2}}} a_L^{\frac{1}{2}} \right],$$

где  $D$  - фрактальная размерность ( $1 < D < 2$ );  $E' = \left[ \frac{(1-\mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\mu_2^2)}{E_2} \right]^{-1}$  - приведенный модуль упругости,  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $\psi$  - коэффициент, учитывающий различие площади среза неровности с фактическим пятном контакта;  $a_L$  - максимальная площадь среза неровности на некотором уровне от линии выступов, равная

$$a_L = \left[ \frac{3\pi(3-D)F_n}{4E'G^{D-1}} \right]^{2/(3-D)}$$

Здесь  $F_n$  - нагрузка;  $G$  - параметр фрактальной шероховатости.

При оценке контактной жесткости учитывались следующие, полученные ранее [2], корреляционные связи:

$$D = \frac{2,459}{R_q^{0,0208}} - 1; \psi = 6,62^{-0,84}; R_q^2 = \frac{G^{2(D-1)} L_m^{2(2-D)}}{\sin \left[ \frac{\pi(2D-3)}{2} \right] \Gamma(2D-3)}$$

На рис. 2 представлены зависимости нормальной контактной жесткости от нагрузки при разной фрактальной размерности и шероховатости.

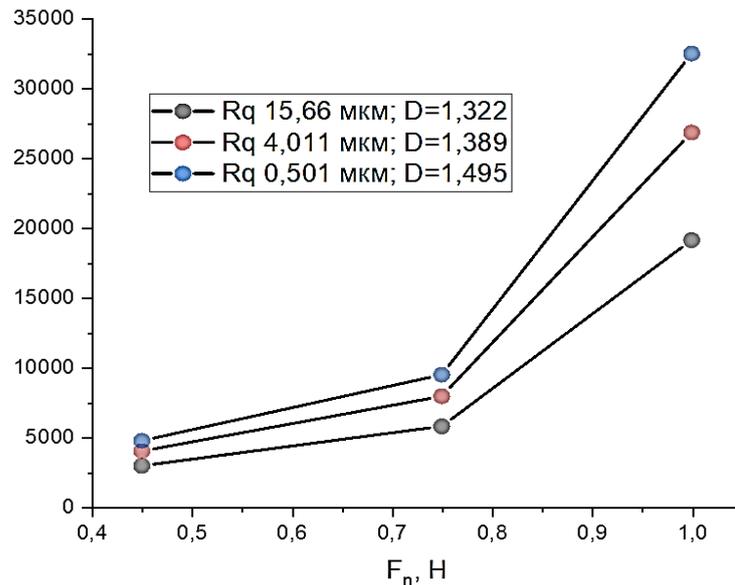


Рис. 2. Зависимость нормальной контактной жесткости от нагрузки

Из рис. 2 можно сделать вывод, что фрактальная размерность оказывает влияние на эксплуатационные свойства изделия даже в большей мере, чем высотные параметры, а задавшись требуемой контактной жесткостью при конструктивном значении нагрузки и применяемых материалах, можно определить необходимую фрактальную размерность и среднее квадратическое отклонение ординат шероховатой поверхности (например, при фрактальной размерности  $D = 1,369$  и нагрузке 750 мН контактная жесткость оказалась равной 7919 Н/мм). Если рассматривать контактную жесткость шероховатого слоя, что очень важно при проектировании прецизионных устройств с малыми контактными давлениями в соединениях, то назначение свойств поверхности с требуемыми функциональными показателями и производство готовых изделий представляет собой довольно сложную задачу.

### Опорная кривая фрактальной поверхности

Опорная кривая, предложенная в 1933 году Абботтом и Файерстоуном [3], показывает распределение материала в шероховатом слое и, таким образом, определяет несущую способность поверхности (рис. 3).

На базе опорной кривой в соответствии со стандартом STN ISO 13 565-2 [4] приняты следующие обозначения:

- $Rk$  – глубина сердцевины профиля;
- $Mr1$  – уровень, отделяющий сердцевину профиля от единичных выступов;
- $Mr2$  – уровень, отделяющий сердцевину профиля от единичных впадин;
- $Rpk$  – средняя высота единичных вершин, выступающих над сердцевиной профиля;
- $Rvk$  – средняя высота единичных впадин, находящихся под сердцевиной профиля.

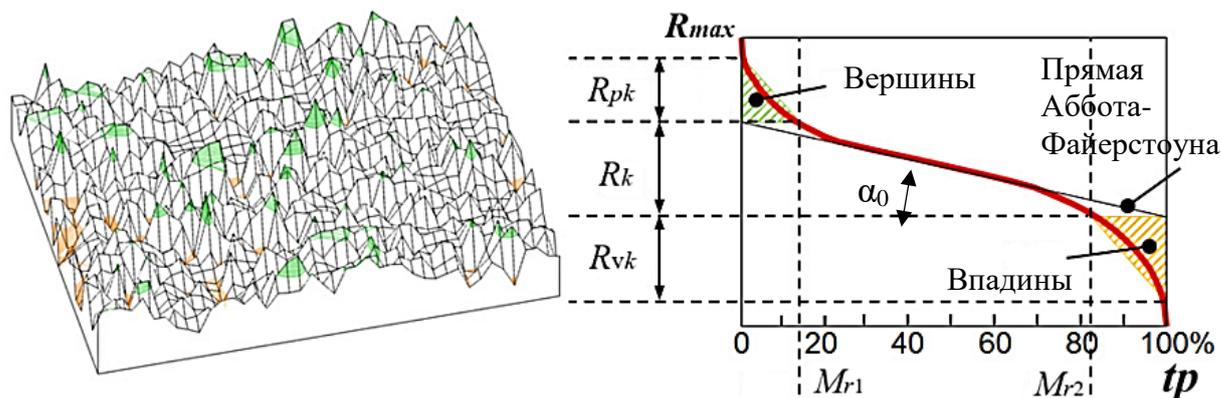


Рис. 3. Опорная кривая

Опорную кривую можно разбить на три части: 1) выступающая часть, содержащая сводную информацию о самых высоких выступах поверхности профиля, и, как правило, эта область частично исчезает при обкатке (приработке) поверхности детали; 2) центральная эксплуатационная часть, которая является наиболее важной и определяет срок службы детали; 3) область впадин служит в качестве резервуаров для смазочного материала.

Контактное взаимодействие слабонагруженных соединений реализуется в первой части опорной кривой, поэтому описание этой части кривой является неотъемлемым условием моделирования процессов взаимодействия фрактальных поверхностей. Кривая Аббота-Файерстоуна является хорошей характеристикой для оценки функциональных свойств поверхностей. Опорная кривая позволяет различать различные поверхности с одинаковым значением  $Ra$  или другими характеристиками высоты, т.е. каждый тип поверхности характеризуется своей формой кривой Аббота. Современное оборудование для измерения шероховатости с соответствующим программным обеспечением позволяет оценивать и отображать различные свойства поверхности (рис. 4).

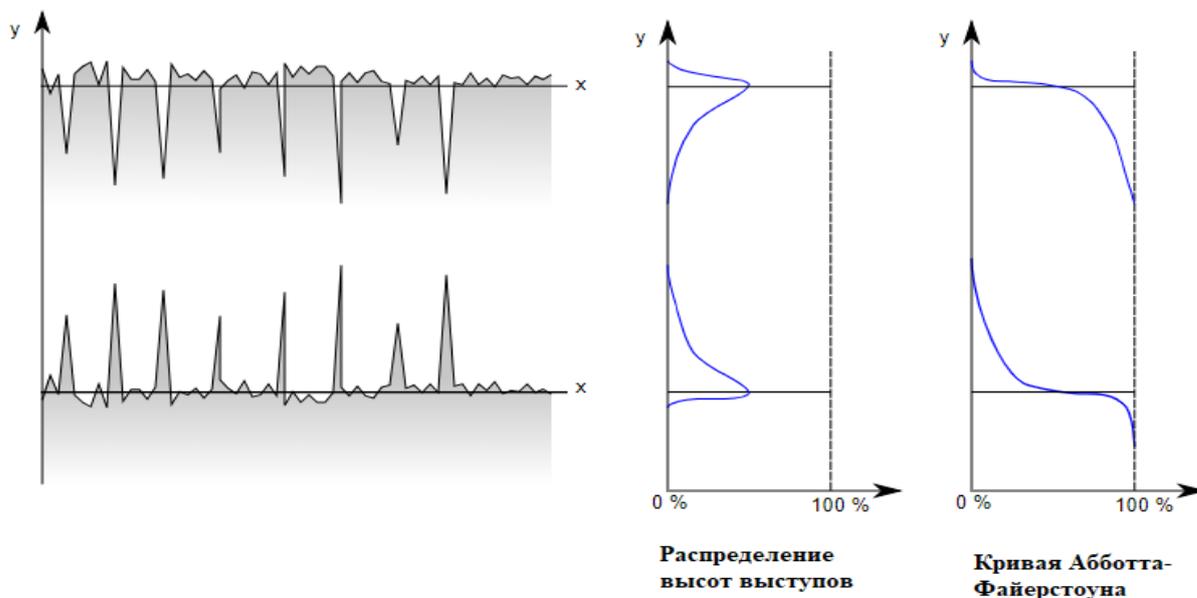


Рис. 4. Профили поверхности и их опорные кривые

Кривые Аббота, полученные с помощью соответствующего программного обеспечения, дают визуализированное представление об их общих формах, но они

не дают конкретной оценки, с помощью которой можно сравнивать поверхности, обеспечивающие те или иные функциональные свойства.

В настоящей работе для обеспечения заданных функциональных свойств трибосопряжения (например, заданной контактной жёсткости, герметичности и т.п.) предлагается использовать угол наклона кривой Аббота-Файерстоуна для сердцевины профиля шероховатой поверхности. Например, анализ полученной опорной кривой поверхности из рис. 1 дает угол наклона  $\alpha_0 \approx 18^\circ$  (рис. 5).

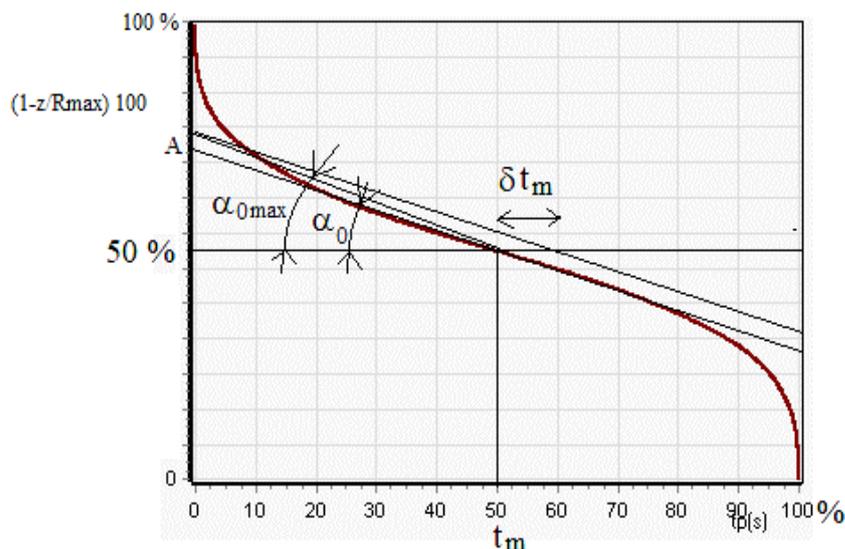


Рис. 5. Параметры опорной кривой

Опорная кривая, построенная в координатах «относительная высота» - «опорная площадь», представленных в процентах, позволяет определить угол  $\alpha_0$  как

$$\alpha_0 = \operatorname{arctg} \frac{(A - 50)}{t_m}.$$

В соответствии с ГОСТ 2.309-73 «Обозначение шероховатости поверхностей» при проектировании на чертеже для данного примера следует указать  $t_{50} 50 \pm 10 \%$ . Но стоит сказать, что среднее значение параметра  $t_{50} 50\%$  на кривой Аббота не указывает на конкретное распределение материала в шероховатом слое, так как через эту точку может проходить множество прямых под разными углами, характеризующих поверхности после разных видов обработки. Разброс значений угла  $\alpha_0$  при выборе режимов обработки поверхности лежит в пределах

$$\Delta = \alpha_0 \pm \left( \operatorname{arctg} \left( \frac{A - 50 + \delta t_m \operatorname{tg} \alpha_0}{t_m} \right) - \alpha_0 \right)$$

### Опорная кривая как инструмент оценки качества поверхности

Математическое выражение начальной части кривой Аббота, исходя из фрактальных представлений о структуре шероховатого слоя, можно записать в виде

$$t_p = \frac{\pi D}{4(2 - D)} \left( \frac{c}{G^{D-1}} \right)^{\frac{2}{2-D}} \frac{c^*}{A_a} \quad (1)$$

Здесь  $c^*$  - корректирующий коэффициент, зависящий от выбранного значения номинальной площади и фрактальной размерности;  $c$  - высота, измеряемая от плоскости выступов;  $A_a$  - номинальная площадь.

С другой стороны, относительная опорная длина определяется следующей зависимостью (Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов и др. [6 - 9])

$$t_p = t_m \left( \frac{z}{R_p} \right)^{\frac{t_m R_p}{50 R_a} - 1} \quad (2)$$

Сопоставление уравнений (1) и (2) (правые части) показывает наличие связи между стандартными по ГОСТ 2789-73 параметрами и фрактальными показателями. При этом в уравнении (1) вместо  $c$  следует подставить  $c = \frac{z}{R_p} R_p$ .

Предложенная зависимость (1) для начального участка кривой Абботта является попыткой достичь непараметрического определения качества обработанной поверхности. Показано, что изучение разных участков кривой Абботта способствует лучшему пониманию качества обработанной поверхности с точки зрения обеспечения требуемых эксплуатационных свойств, а также для практического использования средств технологии и метрологии. Соответствие качества обработанной поверхности параметрам, полученным в результате расчета, с помощью опорной кривой предполагает проведение ряда технологических операций и выбора таких режимов обработки на образцах, которые способны достичь требуемого качества поверхности.

В качестве параметра, связывающего качество поверхности, которая обеспечивает требуемые функциональные свойства трибосистемы, с технологией изготовления, предлагается использовать угол наклона  $\alpha_0$ , который в основном отражает характер кривой распределения материала в профиле. Он также может быть задан конструктором для обеспечения функционального свойства поверхности.

Для установления связи угла наклона  $\alpha_0$  с видами технологической обработки необходимо использовать методы планирования экспериментов и анализ результатов, которые являются важными этапами в раскрытии природы и хода технологического процесса. Для описания технологического процесса, который обеспечит требуемое качество обработки поверхности, используют линеаризованную модель, которая будет получена с помощью логарифма модели степенной функции. График эксперимента предполагает установку значений (называемых уровнями) для факторов, которые будут скорректированы в ходе эксперимента. Для линейной модели факторы должны иметь нижний уровень (минимальный) и верхний уровень (максимальный). Полный факторный эксперимент позволит получить математическое описание исследуемой зависимости, например, в виде

$$\alpha_0 = C_{\alpha_0} a_p^a f^b v_s^c,$$

где  $C_{\alpha_0}$  – постоянная;  $a, b, c$  – показатели степени, определяемые в процессе проведения полного факторного эксперимента (ПФЭ  $2^3$ );  $a_p$  – глубина резания, мм;  $f$  – подача, мм/об;  $v_s$  – скорость, мм/мин.

Линейную регрессионную модель можно представить в виде

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3.$$

Здесь  $Y = \log \alpha_0$ ;  $B_0 = \log C_{\alpha_0}$ ;  $B_1 X_1 = a \log a_p$ ;  $B_2 X_2 = b \log f$ ;  $B_3 X_3 = c \log v_s$ .

Модель приведена для учёта основных факторов, и её можно усложнить, если учитывать параметры (переменные факторы), относящиеся к системе «станок-приспособление-инструмент-заготовка». Выявив уравнение регрессии, можно определить какой фактор существенно влияет на значение выходного параметра, в качестве которого выступает угол  $\alpha_0$ . Изменяя этот фактор, можно будет обеспечить требуемый угол. Для этого следует провести ряд экспериментов по оценке угла  $\alpha_0$ ,

которое обеспечивает каждый вид технологии обработки поверхности.

### **Заключение**

Анализ работ показал существование связи между фрактальными показателями и стандартными профильными параметрами качества поверхности. Такая непараметрическая оценка качества поверхности в виде опорной кривой также может быть описана в рамках представления поверхности как фрактального объекта. Опорная кривая может выступать как инструмент оценки качества поверхности, определяющей эксплуатационные свойства, и как эталон сравнения при отладке технологии производства детали. Соответствие требуемой структуры поверхности и получаемой в результате производственной деятельности можно оценивать по критерию близости опорных кривых. В качестве критериев можно использовать наклон аппроксимирующей прямой в средней части кривой Абботта  $\alpha_0$  и параметр  $t_m$ .

Таким образом, можно представить следующие результаты работы:

1. Приведено описание части кривой Абботта с помощью таких фрактальных показателей, как размерность  $D$  и параметр фрактальной шероховатости  $G$ .
2. Показано, что процедура сравнения требуемого качества поверхности, обеспечивающего необходимые эксплуатационные свойства, со способами технологического изготовления, может быть выполнена за счет применения опорной кривой и угла наклона  $\alpha_0$ .
3. Предлагается на чертеже ответственных или слабонагруженных деталей вносить следующее обозначение шероховатости:

$$\sqrt{\begin{array}{c} Ra\ 3.2; t_{50}\ 50 \pm 10\% \\ \alpha_0\ 18 \pm 3^\circ \end{array}}$$

Для обеспечения указанных параметров поверхности должен быть выбран соответствующий технологический процесс изготовления детали.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Маджумдар, А. Фрактальная модель упругопластического контакта шероховатых поверхностей / А. Маджумдар, Б. Бхушан // Современное машиностроение. Сер. Б. - 1991. - №6. - С.11-23.
2. Тихомиров, В.П. Моделирование нормальной контактной жесткости шероховатых поверхностей при малых нагрузках / В.П. Тихомиров, М.Г. Шалыгин, М.А. Измеров (в печати).
3. Abbott, E.J. Specifying surface quality / E.J. Abbott, F.A. Firestone // Mechanical Engineering. – 1933. - 55:569-572.
4. ISO 13565-2. Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties // Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve. – 1996.
5. Измеров, М.А. Моделирование шероховатых поверхностей на основе теории фракталов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021619563, 15.06.2021. Заявка № 2021615709 от 19.04.2021.
6. Крагельский И.В. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. - М.: Машиностроение, 1978. - Кн. 1. – 1978. - 400 с.
7. Горячева, И.Г. Контактные задачи в трибологии / И.Г. Горячева, М.Н. Добычин // М.: Машиностроение, 1988. - 256 с.
8. Демкин, Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей / М.: Наука, 1970. - 266 с.

9. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / М.: Машиностроение, 1987. - 208 с.

V.P. Tikhomirov, M.A. Izmerov, M.G. Shalygin  
Bryansk State Technical University,  
Bryansk, Russia, m.izmerov@yandex.ru

## DESIGN AND PRODUCTION TECHNOLOGY OF THE SURFACE OF MACHINE PARTS WITH SPECIFIED PERFORMANCE PROPERTIES

### Abstract

The paper considers the issues of ensuring the specified operational properties of friction pairs by creating the required microgeometry of the surface obtained by modeling the behavior of a tribosystem based on fractal models of engineering surfaces. The connection of the type of processing with the required surface quality is ensured by implementing a given Abbott reference curve using the selected manufacturing method.

*Keywords:* fractal dimension, reference curve, surface modeling, surface quality.

УДК 621.892.86

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-240

В.Ю. Шолом<sup>1</sup>, А.М. Казаков<sup>1</sup>, А.В. Морозов<sup>2</sup>, А.А. Смелик<sup>2</sup>, Д.А. Маньшев<sup>3</sup>,  
И.В. Поплавский<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «Хозрасчётный творческий центр Уфимского авиационного института»,  
Уфа, Россия, gosoil@gosoil.ru

<sup>2</sup>ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

<sup>3</sup>ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны Российской Федерации»,  
Москва, Россия

## ОПЫТ РАЗРАБОТКИ КОНСЕРВАЦИОННЫХ И РУЖЕЙНЫХ МАСЕЛ

### Аннотация

В работе представлены результаты разработки консервационных и ружейных масел для Министерства обороны Российской Федерации, предприятий оборонно-промышленного комплекса, гражданской промышленности и населения. Приведены результаты лабораторных испытаний защитных (консервационных) и противоизносных свойств новых универсальных консервационных и рабоче-консервационных масел. Показано, что защитные и противоизносные свойства, комплексные показатели защитной способности и прогнозируемые сроки защиты изделий, покрытых новыми консервационными и ружейными маслами выше чем у аналогичных масел, применяемых в Вооружённых силах Российской Федерации.

*Ключевые слова:* стрелковое и артиллерийское оружие, военная техника, защита от коррозии, консервационные масла, ружейные масла.

### Введение

Изделия и механизмы из черных и цветных металлов и сплавов при хранении, транспортировке и эксплуатации под воздействием неблагоприятных условий окружающей среды подвергаются коррозии. Из всех известных видов коррозии