

---

---

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК381.53.08.519

Ю. С. АНДРЕЕВ, В. В. МЕДУНЕЦКИЙ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Представлен анализ результатов исследований по изменению микрорельефа поверхностей в процессе их трения скольжения.

*Ключевые слова:* трение скольжения, микрогеометрия поверхности, параметрический критерий оценки, непараметрический критерий оценки.

**Введение.** Одной из актуальных проблем, связанных с трением, является износ изделий. Расходы на восстановление изделий в результате износа огромны, причем ежегодно они увеличиваются. Даже незначительное увеличение срока службы изделий и оборудования практически равноценно вводу новых производственных мощностей. Несмотря на обширный и разнообразный теоретический и экспериментальный материал наука о трении остается до сих пор недостаточно изученной. Следует отметить, что во многих случаях использование результатов экспериментальных исследований не представляется возможным, так как конкретные реальные условия не всегда согласуются с условиями эксперимента. Все это в полной мере относится к оценке влияния микрогеометрии поверхностей на процесс их трения. Достоверно известно лишь то, что трение и износ деталей в значительной степени зависят от микрогеометрии поверхностей.

В настоящей статье приведены результаты исследований, задачами которых являлись:

— подтверждение или опровержение наличия так называемой „равновесной“ шероховатости на этапе установившегося износа трущихся поверхностей с помощью современных средств измерения;

— сравнение по результатам эксперимента информативности параметрических и непараметрических критериев оценки микрогеометрии поверхностей.

**„Равновесная“ шероховатость.** В середине XX в. проф. И. В. Крагельским было обнаружено явление, которое он назвал установившейся или „равновесной“ шероховатостью [1]. Суть этого явления заключается в том, что независимо от исходной шероховатости трущихся поверхностей их микрорельеф приобретает установившееся состояние. Шероховатость получила название „равновесной“ вследствие того, что в конце периода приработки поверхности параметры  $R_a$  и  $R_z$  остаются неизменными в процессе трения. Нужно признать, что в то время использовались стандартные критерии шероховатости, которые были доступны для измерения, так как не было реальной возможности провести более „тонкий“ эксперимент.

**Методы описания микрогеометрии.** В настоящее время известны два метода описания микрогеометрии поверхности: параметрический и непараметрический.

Первый метод сводится к использованию различных параметров профиля поверхности, чаще всего  $R_a$ ,  $R_z$ . При этом на практике технологическое обеспечение функционального свойства поверхности заключается в достижении заданного значения параметра шероховатости. Практическая значимость параметрического метода наглядно демонстрируется простым примером: см. рис. 1, где показаны два зеркально противоположных профиля поверхностей (здесь  $R_{\max}$  — максимальная высота профиля — отклонение от нулевой линии  $m$ ). Различие функциональных свойств данных поверхностей очевидно, а стандартные параметры одинаковы.

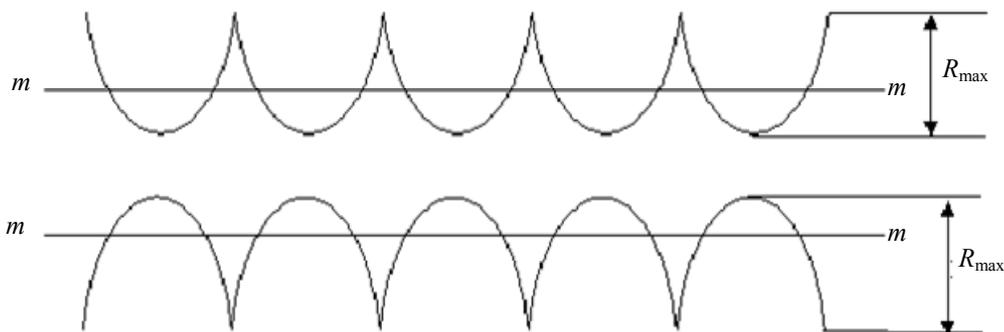


Рис. 1

Шероховатость каждой отдельной поверхности, как правило, нормируется только одним параметром ( $R_a$  или  $R_z$ ), что не позволяет определить структуру рельефа поверхности, а следовательно, ее функциональные свойства.

К преимуществам данного метода относится простота описания, однако такое упрощение приводит к потере информации о микрорельефе. Таким образом, применение параметрического метода оценивания и контроля микрогеометрии практически исключает возможность ее оптимизации для конкретного функционального свойства поверхностей.

В 1980-х гг. проф. В. А. Валетовым была выдвинута идея непараметрического подхода [2], суть которого состоит в следующем:

- в качестве критериев оценки и контроля микрогеометрии поверхностей используются графические изображения различных функций: для точного оценивания предпочтительными являются графики функций плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей, а в пределе — графических изображений профиля или микротопографии поверхностей; при менее жестких требованиях достаточно использовать графические изображения опорных кривых профилей (кривых Аббота) или графиков функций распределения ординат или тангенсов углов наклона профилей;

- нормируются конкретные функциональные свойства поверхностей с присвоением им постоянных номеров и указанием этих номеров на знаках шероховатости;

- экспериментально определяются наилучший из возможных микрорельефов для конкретного функционального свойства поверхности и технология его получения;

- контроль микрогеометрии при серийном производстве осуществляется путем наложения графического изображения функции контролируемой поверхности на эталонное изображение этой функции.

**Микрорельеф в процессе трения скольжения.** Для изучения „поведения“ микрорельефа поверхностей в процессе их трения скольжения была разработана схема планируемого

эксперимента (рис. 2). Суть эксперимента заключалась в испытаниях на машине трения образцов с различной исходной микрогеометрией поверхности [3].



Рис. 2

В качестве образцов использовались пластины, изготовленные из стали 45 ГОСТ 1577-93, и стержневые инденторы из стали 45-Н-Б ГОСТ 1051-73. Габаритные размеры пластин:  $170 \times 105 \times 13$  мм; стержней:  $D=11$  мм,  $l=60$  мм. Данные о способах получения образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Вид обработки | Образцы-стержни                      |                                                       | Образцы-пластины                     |                                                       |
|---------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|               | Инструмент                           | Режим резания                                         | Инструмент                           | Режим резания                                         |
| Фрезерование  | Концевая фреза, $\varnothing 40$     | $n=1600$ об/мин,<br>$t=0,1$ мм,<br>$S=25$ мм/мин      | Концевая фреза, $\varnothing 40$     | $n=315$ об/мин,<br>$t=0,1$ мм,<br>$S=25$ мм/мин       |
|               | Торцевая фреза, $\varnothing 120$    | $n=400$ об/мин,<br>$t=0,1$ мм,<br>$S=80$              | Торцевая фреза, $\varnothing 120$    | $n=400$ об/мин,<br>$t=0,1$ мм,<br>$S=80$              |
| Шлифование    | Шлифовальный круг, $\varnothing 250$ | $n=2800$ об/мин,<br>$t=0,01$ мм,<br>$S=3,5$ мм/проход | Шлифовальный круг, $\varnothing 250$ | $n=2800$ об/мин,<br>$t=0,01$ мм,<br>$S=3,5$ мм/проход |
| Точение       | Подрезной резец                      | $n=800$ об/мин,<br>$t=0,1$ мм,<br>$S=0,015$ мм/об     | —                                    | —                                                     |
|               | Отрезной резец                       | $n=800$ об/мин,<br>$t=0,1$ мм,<br>$S=0,015$ мм/об     |                                      |                                                       |
| Резка         | Дисковая пила, $\varnothing 160$     | $n=40$ об/мин,<br>$t=0,01$ мм,<br>$S=40$ мм/мин       |                                      |                                                       |

Примечание:  $n$  — частота вращения,  $t$  — глубина резания,  $S$  — подача.

После изготовления образцов были проведены измерения на профилометре, в результате которых были получены стандартные параметрические критерии оценки шероховатости  $R_a$  и  $R_z$  исходных рабочих поверхностей образцов, а также построены графики функций плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей.

Далее образцы испытывались на машине трения. В процессе ее работы совершается возвратно-поступательное движение стержневых инденторов, установленных в подвижных каретках, по плоским образцам-пластинам.

Согласно схеме эксперимента после каждого испытания на машине трения образцы вновь подвергались измерениям на профилометре в целях оценивания изменений параметрических и непараметрических критериев.

В итоге был получен результат, аналогичный полученному проф. И. В. Крагельским: т.е. по окончании периода приработки поверхностей настал период так называемой „установившейся шероховатости“, характеризуемой постоянством параметров  $R_a$  и  $R_z$ . Действительно, данные параметры изменялись лишь в пределах погрешности измерения (см. табл. 2, где приведены результаты испытаний для одного образца).

Таблица 2

| Период                       | Длительность испытания, с, при нагрузке в 100 Н | Количество циклов | Параметр $R_a$ | Параметр $R_z$ |
|------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| Приработка                   | 55                                              | 30                | 4,570          | 26,196         |
|                              | 320                                             | 180               | 4,421          | 24,418         |
| Установившаяся шероховатость | 585                                             | 330               | 3,962          | 21,803         |
|                              | 850                                             | 480               | 3,920          | 21,812         |
|                              | 1390                                            | 780               | 3,941          | 21,765         |

Однако, как подсказывает здравый смысл, при контакте трущихся поверхностей микрорельеф неизменным быть не может. Это убедительно доказывают представленные на рис. 3, а, б соответственно графики плотности распределения ординат ( $Y$ ) и тангенсов углов наклона ( $\text{tg } \varphi$ ) профиля по окончании каждого цикла испытаний для одной поверхности одного образца, здесь  $W$  — параметр, характеризующий, насколько часто значения  $\text{tg } \varphi$  и  $Y$  фиксируются на исследуемой поверхности. Очевидно, что в этом случае значения плотностей распределения различны: это доказывает факт изменения микрорельефа поверхности в период установившейся шероховатости, причем данное изменение было зафиксировано на всех исследуемых поверхностях.

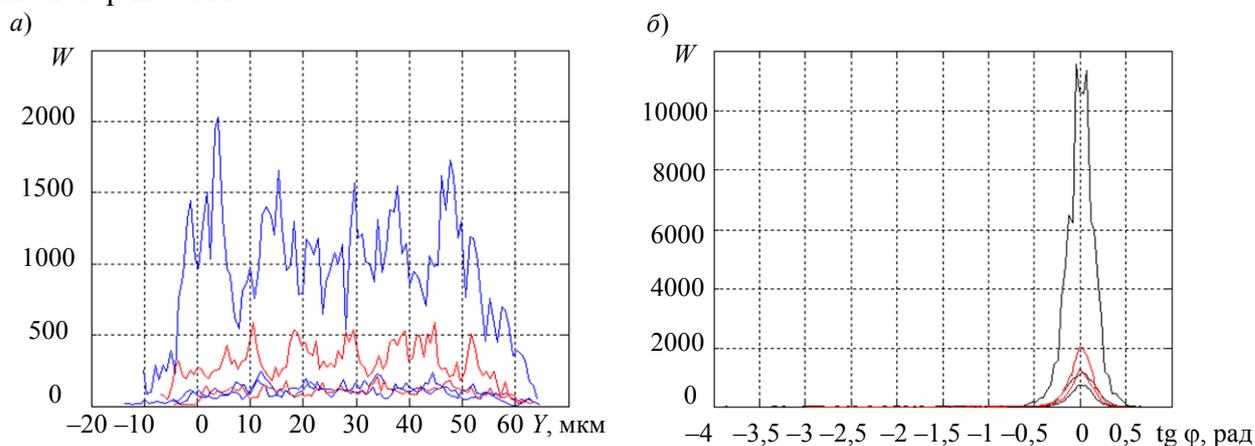


Рис. 3

**Заключение.** В ходе эксперимента было достигнуто постоянство параметрических критериев  $R_a$  и  $R_z$ , т.е. наступление периода установившейся шероховатости, тогда как непараметрические критерии непрерывно изменялись. Построенные графики плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля подтверждают мнение о постоянном изменении микрогеометрии поверхности в процессе трения скольжения.

В дальнейшем планируется существенно увеличить объем экспериментальных исследований, в процессе которых может быть подтверждена или опровергнута гипотеза о циклическом характере изменения микрогеометрии трущихся поверхностей. В перспективе это позволит коренным образом пересмотреть существующую систему нормативной документации

в области описания, технологического обеспечения и контроля микрогеометрии. Установив оптимальную микрогеометрию поверхностей трения, процесс их приработки можно будет свести к минимуму, что позволит существенно увеличить время работы изделий в целом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 344 с.
2. Валетов В. А., Мурашко В. А. Основы технологии приборостроения: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 180 с.
3. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб: ПИМаш, 2006. 168 с.

#### *Сведения об авторах*

**Юрий Сергеевич Андреев**

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: luser3@yandex.ru

**Виталий Викторович Медунецкий**

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: medunezkij@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
11.11.11 г.