

---

---

# 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.

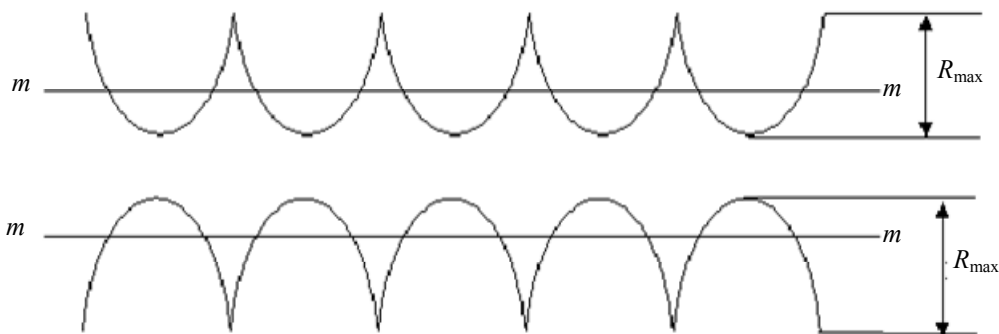


Рис. 1

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].

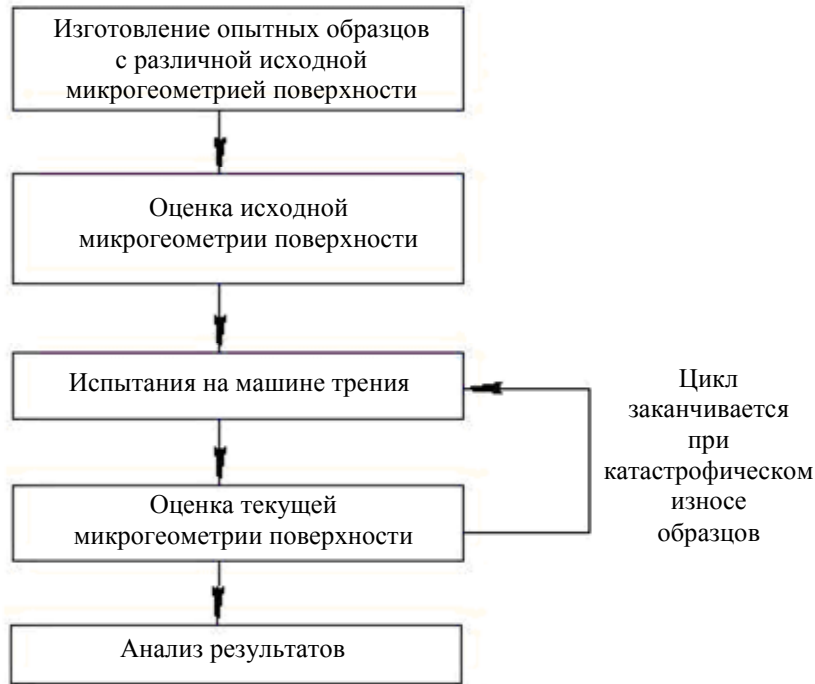


Рис. 2

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: 170×105×13 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, Ø40	$n=1600$ об/мин, $t=0,1$ мм, $S=25$ мм/мин	Концевая фреза, Ø40	$n=315$ об/мин, $t=0,1$ мм, $S=25$ мм/мин
	Торцевая фреза, Ø120	$n=400$ об/мин, $t=0,1$ мм, $S=80$	Торцевая фреза, Ø120	$n=400$ об/мин, $t=0,1$ мм, $S=80$
Шлифование	Шлифовальный круг, Ø250	$n=2800$ об/мин, $t=0,01$ мм, $S=3,5$ мм/проход	Шлифовальный круг, Ø250	$n=2800$ об/мин, $t=0,01$ мм, $S=3,5$ мм/проход
Точение	Подрезной резец	$n=800$ об/мин, $t=0,1$ мм, $S=0,015$ мм/об	—	—
	Отрезной резец	$n=800$ об/мин, $t=0,1$ мм, $S=0,015$ мм/об		
Резка	Дисковая пила, Ø160	$n=40$ об/мин, $t=0,01$ мм, $S=40$ 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.

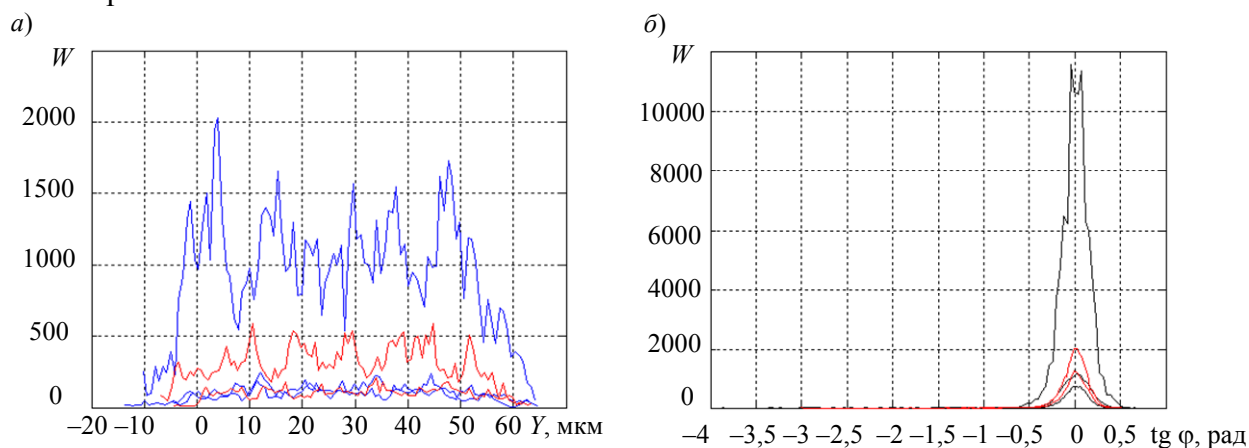


Рис. 3

**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.