

## Теоретические и экспериментальные исследования шероховатости обработанной поверхности

Новиков Ф.В., докт. техн. наук, Шкурупий В.Г.

(г. Харьков, Украина)

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований шероховатости обработанной поверхности

При анализе влияния различных методов обработки на эксплуатационные показатели деталей машин пользуются относительной опорной длиной профиля обработанной поверхности, наиболее информативной характеристикой шероховатости поверхности [1]. Существуют аналитические подходы к ее определению для условий шлифования [2,3,4]. Вместе с тем, для выработки научно-обоснованных рекомендаций требуется дальнейшее проведение исследований относительной опорной длины профиля обработанной поверхности и ее взаимосвязи с эксплуатационными характеристиками обработанных поверхностей деталей машин.

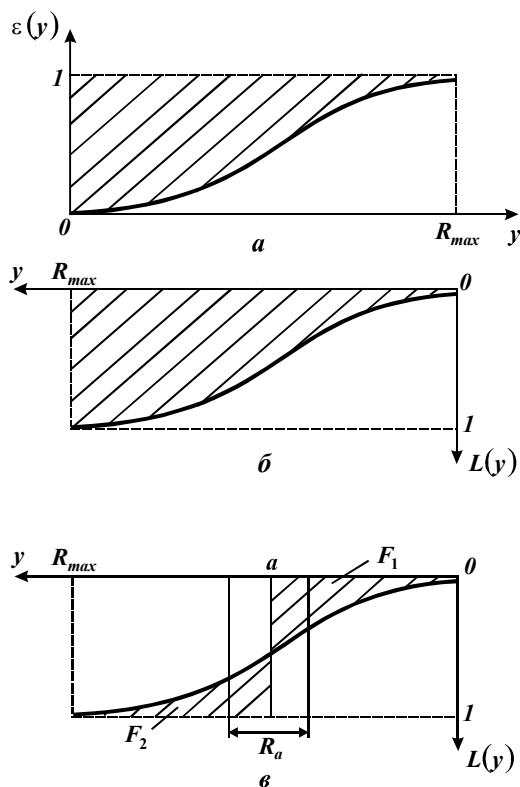


Рис. 1. Общий вид функций  $\varepsilon(y)$ ,  $L(\bar{y})$ .

Общий вид функции показан на рис. 1,а. Заштрихованным выделен оставшийся на обработанной поверхности материал в виде микронеровностей. Наибольший выступ микронеровностей соответствует значению  $y = R_{max}$  (где  $R_{max}$  - параметр шероховатости обработки). Наибольшая впадина соответствует значению  $y = 0$ .

В работе [5] аналитически с позиции теории вероятностей аналитически описаны закономерности шлифования с помощью функции распределения  $\varepsilon(y)$  - относительной полноты профиля круга при шлифовании прямолинейного образца, движущегося с постоянной скоростью  $V'_{дет}$  по нормали к рабочей поверхности круга:

$$\varepsilon(y) = 1 - e^{-\frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}{3 \cdot b \cdot V'_{дет}} \cdot y^3}, \quad (1)$$

где  $k$  - поверхностная концентрация зерен круга, шт/м<sup>2</sup>;  $b$  - максимальная высота выступания зерен над уровнем связки круга, м;  $\gamma$  - угол при вершине конусообразного режущего зерна;  $V_{кр}$  - скорость круга, м/с;  $y$  - координата, исходящая из вершины максимально выступающего над уровнем связки зерна, к кругу, м.

Общий вид функции показан на

От функции  $\varepsilon(y)$  нетрудно перейти к функции относительной опорной длины профиля обработанной поверхности  $L(y)$ . Для этого необходимо начало координат поместить в точке  $y = R_{max}$ , ввести новую координату  $\bar{y} = R_{max} - y$  и рассмотреть противоположную вероятностную функцию:

$$L(\bar{y}) = 1 - \varepsilon(\bar{y}) = e^{-\frac{tg\gamma \cdot k \cdot V_{кр}}{3 \cdot b \cdot V'_{дем}} \cdot (R_{max} - \bar{y})^3} \quad (2)$$

Общий вид функции  $L(\bar{y})$  показан на рис. 1,б. Как и на рис. 1,а, заштрихованным выделен оставшийся на обработанной поверхности материал в виде микронеровностей. Сплошной материал (без микронеровностей) начинается при  $\bar{y} \geq R_{max}$ . Располагая аналитической зависимостью для описания функции  $L(\bar{y})$ , можно определить параметр шероховатости обработки  $R_a$ . Исходя из рис. 1,в, он определяется из выражения

$$R_a = \frac{F_1 + F_2}{1} \quad (3)$$

где  $F_1$  – площадь, ограниченная линиями  $\bar{y} = a$ ,  $L(\bar{y})=0$  и функцией  $L(\bar{y})$ ;  $F_2$  – площадь, ограниченная линиями  $\bar{y} = a$ ,  $L(\bar{y})=1$  и функцией  $L(\bar{y})$ .

Значение  $\bar{y} = a$  определяет положение средней линии, полученной из равенства площадей, занимаемых выступами и впадинами на участке базовой длины  $l$  обработанной поверхности. Численные расчеты для конкретных условий шлифования показали, что соотношение параметров шероховатости  $R_{max} / R_a$  изменяется в пределах 4...5 [5]. Это указывает на то, что функция  $L(\bar{y})$  может быть (приблизительно) описана прямой линией, проведенной через начало координат и точку с координатами  $\bar{y} = R_{max}$  и  $L(\bar{y})=1$ , рис. 2,а. В данном случае отношение  $R_{max} / R_a = 4$ .

Полученный теоретический результат хорошо согласуется с известными

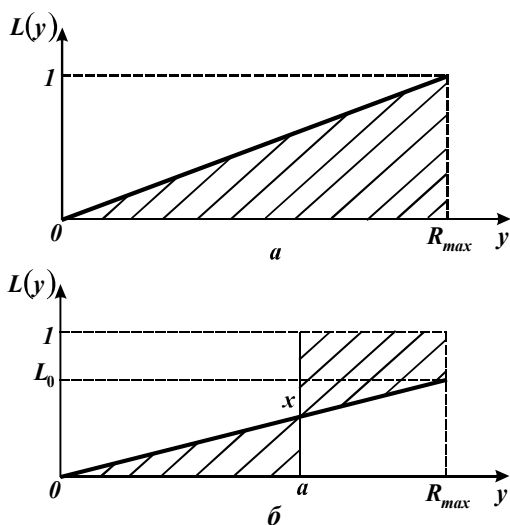


Рис. 2. Вид упрощенной функции  $L(\bar{y})$ .

ми экспериментальными данными. В тоже время установлено, что соотношение при определенных условиях обработки может изменяться в более широких пределах: от 5 до 8 и более. Поэтому рассмотрим теоретически условия формирования такого большого соотношения  $R_{max} / R_a$ , принимая условно функцию относительной опорной длины профиля обработанной поверхности в виде, показанном на рис. 2,б (здесь  $L_0$  – безразмерная величина, изменяющаяся в пределах от 0 до 1).

Исходя из рис. 2,б, произведем расчет параметра шероховатости обработки  $R_a$ . Определим величину  $x$  из геометрического соотношения:

$$\frac{L_0 - x}{a} = \frac{L_0}{R_{max}}, \quad \text{откуда}$$

$$x = L_0 \cdot \left(1 - \frac{a}{R_{max}}\right). \quad (4)$$

Определим первоначально положение средней линии  $\bar{y} = a$  из условия равенства заштрихованных на рис. 2,б площадей:

$$0,5 \cdot a \cdot (L_0 - x) = (R_{max} - a) \cdot (1 - L_0) + 0,5 \cdot x \cdot (R_{max} - a), \quad \text{откуда}$$

$$a = R_{max} \cdot (1 - 0,5 \cdot L_0). \quad (5)$$

Параметр шероховатости обработки  $R_a$  определим из условия:

$$R_a \cdot 1 = 2 \cdot 0,5 \cdot a \cdot (L_0 - x).$$

Откуда с учетом зависимостей (4) и (5), имеем

$$R_a = R_{max} \cdot L_0 \cdot (1 - 0,5 \cdot L_0)^2. \quad (6)$$

Как видим, при  $L_0 = 1$  параметр  $R_a = \frac{R_{max}}{4}$ , что соответствует приведенному выше решению, т.е. расчеты выполнены правильно. Из зависимости (6) следует, что величина  $L_0$  оказывает на параметр  $R_a$  неоднозначное влияние. Расчетные данные, характеризующие изменение параметра  $R_a$  от  $L_0$ , приведены в табл. 1 (для  $R_{max} = 1$  мкм).

Таблица 1

Расчетные значения  $R_a$  и  $R_{max} / R_a$

$L_0$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$R_a$ , мкм	0	0,09	0,162	0,217	0,256	0,281	0,294	0,295	0,29	0,277	0,25
$R_{max} / R_a$	$\infty$	11,1	6,25	4,54	3,85	3,57	3,4	3,39	3,45	3,7	4,0

С увеличением  $L_0$  от 0 до 0,7 параметр шероховатости обработки  $R_a$  увеличивается, при  $L_0 > 0,7$  – уменьшается, рис.3. Отношение  $R_{max} / R_a$ , наоборот, с увеличением  $L_0$  до значения 0,7 уменьшается, затем увеличивается, принимая при  $L_0 < 0,2$  значения, превышающие 6. Этим показано, что форма относительной опорной длины профиля обработанной поверхности  $L(\bar{y})$  определяет значения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  и соотношения  $R_{max} / R_a$ .

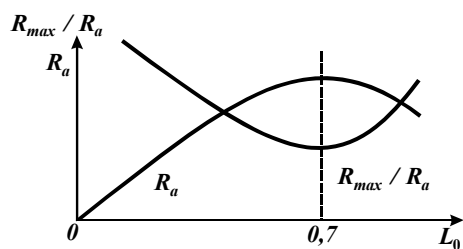


Рис. 3. Характер изменения  $R_a$  и  $R_{max} / R_a$  от  $L_0$ .

Увеличенные значения  $R_{max} / R_a > 6$  обусловлены тем, что на участке базовой длины  $l$  обработанной поверхности площадь, ограниченная впадинами микронеровностей и средней линией, превышает площадь, ограниченную выступами микронеровностей и средней линией. Это может иметь место при шлифовании кругом с притупленными режущими кромками. Например, установ-

лено [1], что наименьшая относительная опорная длина профиля достигается после шлифования абразивным кругом, а наибольшая – после шлифования алмазным кругом на металлической связке и кругом из кубонита. Следовательно, шлифование кругами из синтетических сверхтвёрдых материалов позволяет увеличить опорную площадь и соответственно несущую способность и износостойкость деталей машин. Поэтому при выборе оптимального метода обработки необходимо знать его возможности по формированию как высотных параметров шероховатости  $R_{max}, R_a$ , так и относительной опорной длины профиля обработанной поверхности.

Рассмотрим условия формирования шероховатости поверхности в процессе обработки ионным потоком в вакууме. Известно, что на поверхности металла есть тончайшие адсорбированные пленки, которые при механической, химической или электрохимической очистке лишь изменяют свой состав. В процессе эксплуатации под воздействием излучения в вакууме поверхность детали может изменить параметры шероховатости и оптические характеристики. Для изучения влияния ионного потока в вакууме на поверхностный слой детали был поставлен эксперимент на установке "Булат-3Т". Изменения высотных и структурных параметров шероховатости поверхности изучали на образцах из лент 36НХТЮ после шлифования и полирования.

В процессе ионной бомбардировки адсорбированные на поверхности пленки удаляются и должно происходить распыление выступающих участков неровностей. В табл.2 представлены значения параметров шероховатости поверхности до и после ионной бомбардировки. Режим обработки: ускоряющее напряжение 1,3 кВ; ток дуги 100 А; давление  $1 \times 10^{-4}$  Па; длительность обработки 600 с (импульсы 3/10 с). Электрод – титан ВТ1-0. Анализ табличных данных (табл. 2) показывает, что высотные параметры  $H_{max}$  и  $H_{min}$ , изменяются значительно (в 2...3 раза) в сторону увеличения их значений для образцов с значениями  $R_a$  менее 0,24 мкм.

Таблица 2

Значения параметров шероховатости поверхности до и после ионной бомбардировки ( $\tau = 10$  мин)

Вид предварительной обработки	Высота неровностей, мкм					
	$R_a$		$H_{max}$		$H_{min}$	
	до	после	до	после	до	после
Шлифование абразивное	0,61	0,79	2,19	2,68	3,15	4,04
Шлифование абразивное	0,24	0,26	0,69	1,98	0,99	0,75
Шлифование абразивное	0,23	0,29	0,97	1,67	1,15	1,23
Шлифование абразивное	0,17	0,27	0,39	0,97	0,55	1,18
Шлифование абразивное	0,16	0,30	0,27	1,86	0,61	1,51
Шлифование абразивное	0,12	0,26	0,30	2,09	0,62	0,93
Шлифование абразивное	0,08	0,30	0,13	1,70	0,52	1,12
Полирование абразивное	0,08	0,20	0,20	1,43	0,56	1,58
Полирование абразивное	0,08	0,24	0,18	1,03	0,37	0,97

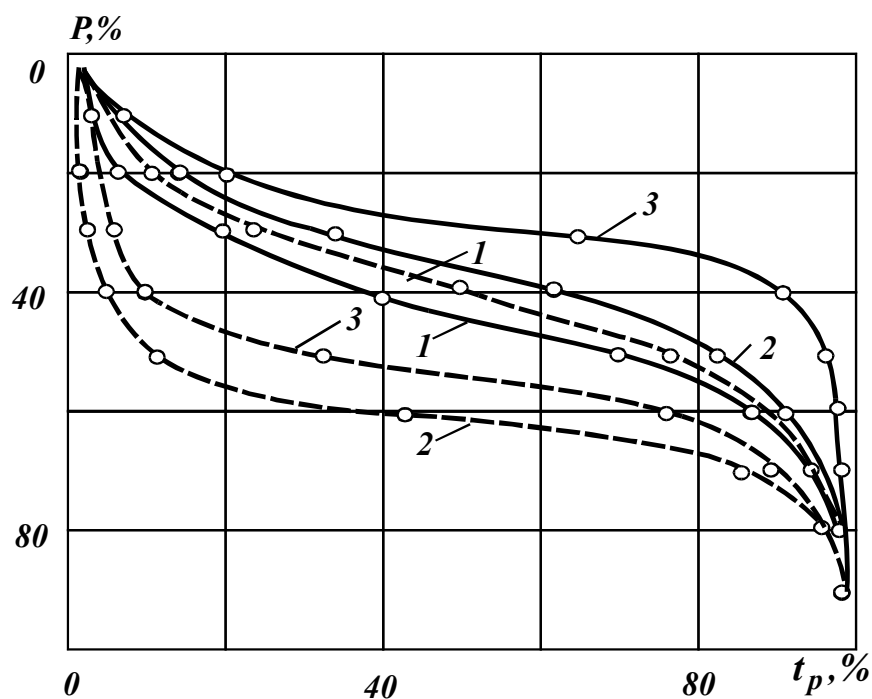


Рис. 4. Опорные кривые поверхностей образцов из стали ЭИ 961 до и после ионной бомбардировки: 1, 2 - шлифование; 3 - полирование; ---- до обработки; - - - после обработки.

Для образцов с значениями  $R_a$  более 0,6 мкм наблюдается незначительное изменение значений параметров шероховатости поверхности.

Полнота опорной кривой 1 увеличилась (для случая шлифования с  $R_a = 0,61\text{мкм}$ ), что можно объяснить преимущественным изменением размеров неровностей у вершин выступов за счет их распыления и частичного осаждения титана.

Анализ опорных кривых показывает, что после шлифования и полирования 2 и 3 наблюдается значительное изменение полноты неровностей в сторону ее снижения.

На рис. 5 приведены профилограммы поверхности образцов до (1, 3, 5) и после (2, 4, 6) ионной бомбардировки.

Подтверждается существенное изменение высотных, шаговых и структурных параметров шероховатости поверхности.

При обработке высокоотражательных поверхностей деталей из алюминиевых и медных сплавов рекомендуются технологические процессы точения и выглаживания взамен абразивного полирования или абразивное полирование с последующим кратковременным электрохимическим полированием. Этим обеспечивается более высокая стабильность оптических характеристик обработанных поверхностей.

При обработке светорассеивающих поверхностей рекомендуется струйно-абразивная обработка, химическое и электрохимическое травление.

Учет формы неровностей критерием шероховатости поверхности в ряде случаев позволяет объяснить недостаточную чувствительность высотных параметров шероховатости поверхности.

Оценка работы выхода электронов и критерий шероховатости поверхности могут быть использованы для описания физико-химического состояния обработанных поверхностей.

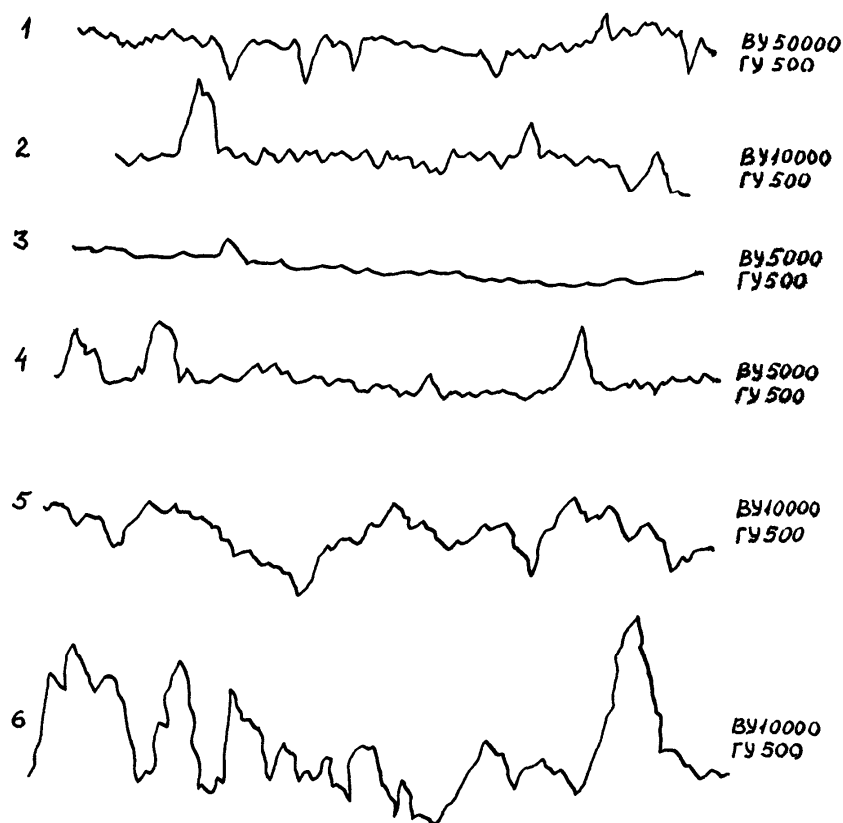


Рис. 5. Профилограммы поверхности образцов до и после ионной бомбардировки: 1, 3, 5 - до и 2, 4, 6 - после обработки.

Разработанные модели абразивного и электрохимического полирования позволяют назначать рациональные режимы обработки светоотражающих поверхностей деталей и исследуемых сплавов.

Изучение верхних участков шероховатых поверхностей позволило установить значения параметров  $b$  и  $\nu$ , характеризующих начальную часть опорных кривых (опорную площадь). Для основных технологических методов обработки они позволяют выполнить ориентировочные расчеты для определения опорной площади шероховатых поверхностей.

Опорная площадь может оказаться одинаковой для нескольких поверхностей, обработанных различными методами. Отличия таких поверхностей устанавливаются по геометрическим характеристикам отдельных микронеровностей: каждому методу обработки соответствует определенный диапазон изменения углов профиля и радиусов закругления выступов в зависимости от высоты шероховатости поверхностей.

В преобладающем большинстве случаев радиус  $r_{np}$  закругления вершин микронеровностей в продольном направлении превышает радиус  $r_n$  закругления в поперечном направлении. Угол  $\beta_n$  профиля микронеровности для поперечного направления больше, чем угол  $\beta_{np}$  для продольного. С уменьшением высоты неровностей наблюдается общая тенденция к умень-

шению углов профиля и соответствующему увеличению радиусов закругления выступов.

Геометрические характеристики микронеровностей, высота неровностей, их шаги связаны между собой. С уменьшением высоты неровностей при каждом методе обработки возрастает соотношение между шагом неровностей профиля  $S$  и высотой  $R_{max}$ . Для большинства методов механической обработки при средней высоте неровностей поверхностей шаг  $S$  поперечной шероховатости не превышает  $40 R_{max}$  (шлифование, точение, строгание, фрезерование, растачивание стальных и чугунных деталей).

Для неровностей меньшей высоты их шаги могут достигать почти  $300 R_{max}$ . Шаг  $S_{np}$  продольной шероховатости обычно превышает шаг поперечной шероховатости. Отношение этих величин в большинстве случаев не превышает 15, хотя в отдельных случаях достигает 40. Абсолютные значения шага продольных неровностей достигают  $800 R_{max}$ . Следовательно, чем больше радиусы закругления выступов, тем меньше углы профиля и больше размеры оснований отдельных неровностей и их шаг (при определенной высоте шероховатости).

Таким образом, за критерий оценки шероховатости, полученной различными методами обработки, можно принять отношение радиуса закругления выступов к высоте неровностей.

При необходимости получения более точных значений, характеризующих опорную площадь и другие геометрические параметры качества поверхности деталей, обязательно следует учитывать конкретные условия выполнения соответствующей технологической операции (материал обрабатываемой детали, получаемую шероховатость при определенных режимах обработки, материал инструмента и т. д.). При этом во многих случаях целесообразно учитывать технологическую наследственность.

#### **Список литературы:**

1. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Рыжов Э.В. – К.: Наук. думка, 1984. – 272 с.
2. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Физические основы процесса шлифования. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1978. – 128 с.
3. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 185 с.
4. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979. – 232 с.
5. Новиков Ф.В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Одесса: ОГПУ, 1995. – 36 с.