

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

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТКИ**

*General characteristic of roughness parameters of surface is given; the approaches to analytical description of roughness are analysed, the interlink of details operational features with roughness parameter of machining is showed.*

В процессе обработки деталей машин не удается получить идеальную поверхность, очерчивающую контур обрабатываемой детали. Вследствие особенностей обработки поверхность принимает вид не прямой линии (в сечении) с наложением на нее пилообразного неравномерного профиля, называемого шероховатостью поверхности. В лучшем случае точность формирования поверхности при обработке обусловлена этой шероховатостью. Чем меньше шероховатость, тем выше точность обработки и идеальнее созданная поверхность. Естественно, говорить о точности созданной поверхности и ее эксплуатационных свойствах можно с позиции шероховатости.

В настоящее время сложилось достаточно четкое представление о структуре и параметрах шероховатости поверхности. ГОСТами определены основные характеристики шероховатости, в том числе дано их математическое описание. Выявлены физические связи между параметрами шероховатости поверхности и эксплуатационными характеристиками деталей машин, что позволяет правильно устанавливать требуемую шероховатость обработки в зависимости от условий, в которых будет работать данная обработанная поверхность.

Вместе с тем, уровень анализа шероховатости поверхности ограничивается экспериментальными данными. До настоящего времени мы не научились правильно аналитически определять параметры шероховатости для различных методов обработки. Это значительно сужает возможности анализа, оптимизации и управления шероховатостью поверхности. В связи с этим, чрезвычайно важной и актуальной задачей следует рассматривать дальнейшее изучение закономерностей формирования шероховатости поверхности с целью ее более полного и правильного аналитического описания.

В настоящее время основным методом оценки шероховатости поверхности является изучение основного и дополнительного распределений отклонений ординат профиля (профилограммы и опорные кривые).

Шероховатость поверхности принято определять по ее профилю. Профиль рассматривается на базовой длине линии, относительно которой определяются и оцениваются параметры шероховатости поверхности (рис. 1).

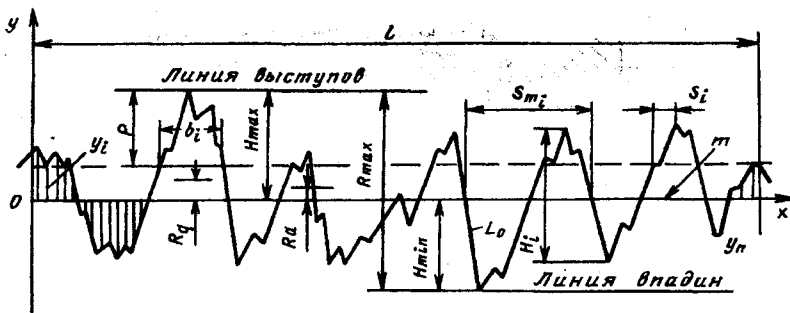


Рис. 1. Профиль шероховатости поверхности и его параметры.

Для нормирования и оценки шероховатости поверхности известно около 30 параметров. Основные из них, принятые в большинстве национальных стандартов на шероховатость поверхности промышленно развитых стран, следующие.

Расстояние между линией выступов и линией впадин профиля в пределах базовой длины - наибольшая высота неровностей профиля  $R_{max}$ . Расстояние от средней линии профиля до высшей точки выступа профиля называется высотой выступа профиля, а расстояние от средней линии профиля до низшей точки впадины - глубиной впадины профиля.

Значительное распространение для оценки шероховатости в машиностроении получили такие параметры как высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$ , среднее арифметическое  $R_a$  и среднее квадратичное  $R_q$  отклонения профиля.

По ГОСТ 2789-73 для количественной оценки шероховатости поверхности на базовой длине  $l$  предусмотрено шесть параметров (рис. 1).

Высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$  определяется как среднее расстояние между находящимися в пределах базовой длины высотами пяти наибольших выступов  $H_{i_{max}}$  и глубинами пяти наибольших впадин профиля  $H_{i_{min}}$ :

$$R_z = \frac{1}{5} \left[ \sum_{i=1}^5 |H_{i_{max}}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i_{min}}| \right], \quad (1)$$

где  $H_{i_{max}}$  - высота  $i$ -го наибольшего выступа профиля;  $H_{i_{min}}$  - глубина  $i$ -й наибольшей впадины профиля.

Среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  - среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины  $l$ :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx, \quad (2)$$

или приближенно:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|, \quad (3)$$

где  $y$  - отклонение профиля, определяющее расстояние между точкой реального профиля и базовой линией (средней линией профиля);  $n$  - число выбранных точек на базовой длине.

Среднее квадратичное отклонение профиля  $R_q$  есть среднее квадратичное значение отклонений профиля в пределах базовой длины

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx}, \quad (4)$$

или приближенно:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2(x_i)}. \quad (5)$$

Длина отрезка средней линии, пересекающего профиль в трех соседних точках и ограниченного двумя крайними точками, называется шагом неровностей профиля. Средний шаг неровностей профиля  $S_m$  - это среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины:

$$S_m = \sum_{i=1}^n S_{m_i}, \quad (6)$$

где  $n$  - число шагов в пределах базовой длины.

Средний шаг неровностей профиля по вершинам  $S$  - это среднее арифметическое шага неровностей профиля по вершинам в пределах базовой длины:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i, \quad (7)$$

где  $n$  - число шагов неровностей профиля по вершинам в пределах базовой длины.

Длина профиля  $L_0$  - это длина, получающаяся, если все выступы и впадины профиля, находящиеся в пределах базовой длины, вытянуть в прямую линию.

Относительная длина профиля  $l_0$  есть отношение длины профиля  $L_0$  к базовой длине  $l$ :

$$l_0 = \frac{L_0}{l}.$$

Опорная длина профиля  $l_p$  определяется суммой длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне  $p$  выступов профиля, линией, эквидистантной средней линии в пределах базовой длины:

$$l_p = \sum_{i=1}^n b_i, \quad (8)$$

где  $b_i$  - длина отрезка, отсекаемого на выступе профиля.

Для сопоставления размеров опорных поверхностей, обработанных различными методами, удобно пользоваться понятием относительной опорной длины профиля  $t_p$ , определяемой отношением опорной длины профиля к базовой длине

$$t_p = \frac{l_p}{l} 100\% = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n b_i \cdot 100\%. \quad (9)$$

Не трудно видеть, что наиболее информативной характеристикой шероховатости поверхности является относительная опорная длина профиля. Это

единственная характеристика, представленная в виде функции. По ее характерным точкам можно определить основные параметры шероховатости. Следовательно, для аналитического представления шероховатости поверхности необходимо в первую очередь аналитически описать функцию относительной опорной длины профиля, формируемую при различных методах механической и физико-технической обработки.

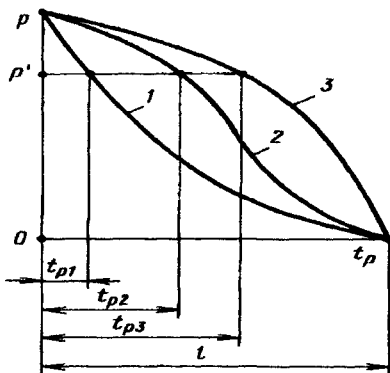


Рис. 2. Кривые относительных опорных длин профилей  $t_p$  при одинаковых уровнях сечения  $p$ : 1 - при черновой обработке; 2 - при чистовой обработке; 3 - при обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД).

На рис. 2 графически представлены зависимости относительной опорной длины профиля.

Каждому из профилей соответствует определенный вид указанной зависимости, и при одном  $p$  наблюдаются различные значе-

ния  $t_p$ .

Для использования опорных кривых профиля при сопоставлении опорных площадей различных поверхностей деталей в общем случае следует строить указанные кривые в координатах  $t_p$  (относительные величины) -  $p$  (абсолютные величины).

Для сравнения различных поверхностей с одинаковой высотой неровностей можно рассматривать опорные кривые профилей, построенных по относительным величинам  $t_p$  и  $\varepsilon = p/R_{max}$ . Эти действия применимы для определения  $t_p$  независимо от закона высотного распределения неровностей.

Для оценки опорной площади поверхностей с нерегулярной шероховатостью, которой свойственны как случайные очертания неровностей, так и их расположение по высоте (поверхности отливок, заготовок после шлифования, хонингования, упрочнения дробью, электроискровой обработки, полирования и др.), можно воспользоваться теорией случайных функций. Профилограммы нерегулярной шероховатости поверхности приближенно могут быть описаны нормальным стационарным процессом. При этих условиях

$$t_p \approx 1 - \Phi(x) = 1 - \Phi\left(3 - \frac{0,8p}{R_a}\right), \quad (10)$$

где  $\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right) dt$  - функция Лапласа.

Задаваясь различными уровнями  $p$  ( $0 < p < 0,5 R_{max}$ ), определяют значения  $t_p$  и строят опорную кривую профиля (в данном случае она получается симметричной относительно средней линии профиля).

Стандартные параметры шероховатости для расчетов, например, контактного взаимодействия целесообразно дополнить параметром  $R_p$ .

Тогда зависимость для оценки величины  $t_p$  (выше средней линии профиля) принимает вид

$$t_p = b' \left(\frac{P}{R_{max}}\right)^{\nu} = t_m \left(\frac{P}{R_p}\right)^{\nu}, \quad (11)$$

где  $b' = t_m \left(\frac{R_{max}}{R_p}\right)^{\nu}$ ;  $\nu = 2t_m \frac{R_p}{R_a} - 1$ ;  $t_p$  - относительная опорная длина профиля по средней линии.

Формулы (10) и (11) позволяют определять опорные площади поверхности и сравнивать их без построения опорных кривых, что значительно снижает трудоемкость оценки шероховатости поверхности. Наибольший практиче-

ский интерес представляет начальная часть опорной кривой профиля, которая описывается формулой  $t_p = b = b' \cdot \varepsilon^{\nu}$ , (где  $b$  и  $\nu$  - параметры аппроксимации начальной части опорной кривой профиля), а также формулой (11). Указанные формулы справедливы в пределах  $0 < t_p \leq 0,5$ . Параметры  $b$  и  $\nu$  могут быть определены несколькими методами: графически, что требует построения опорной кривой профиля, и аналитически, например, по зависимости (11).

Аналитическому описанию относительной опорной длины профиля посвящены в основном работы, касающиеся абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов. Так, в работах Новоселова Ю.К., Королева А.В., Резникова А.Н., Федосеева О.Б., Евсеева Д.Г., Сальникова А.Н., Якимова А.В., Новикова Ф.В. и других ученых [2-6] аналитически с различных позиций описана относительная опорная длина профиля. Это позволило в первом приближении выявить характер изменения относительной опорной длины профиля в зависимости от режимов шлифования и характеристик инструмента, рассчитать основные высотные параметры шероховатости на основе использования функции относительной опорной длины профиля. Данные исследования требуют дальнейшего развития, доведения их до выработки практических рекомендаций по оптимизации и управлению процессами обработки с точки зрения обеспечения требуемой относительной опорной длины профиля и других параметров шероховатости.

Таблица 1

Значения коэффициента отражения и параметров шероховатости поверхности образцов из стали 40X после обработки резанием

Наименование операции	Параметры шероховатости поверхности		Коэффициент отражения
	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	
Фрезерование	11,05...0,52	40...1,4	0,20...0,25
Шлифование предварительное	0,4...0,35	-	0,25...0,31
Шлифование окончательное	0,2...0,16	-	0,48...0,51
Полирование	-	0,4...0,16	0,72...0,74

С целью определения влияния методов обработки резанием на шероховатость поверхности и ее светоотражательную способность были исследова-

ны эталонные образцы из стали 40X (табл.1). Минимальным значениям высотных параметров шероховатости поверхности соответствуют максимальные значения коэффициентов отражения (после абразивного полирования).

Для поверхности образцов после фрезерования увеличиваются интервалы изменения значений параметров шероховатости обработанных поверхностей, при этом их отражательная способность практически мало зависит от изменения режимов обработки. Мы наблюдаем случай незначительного влияния высотных параметров шероховатости на светоотражательную способность. Это можно объяснить соответствием физико-химических свойств обработанных поверхностей, наличием аналогичных неоднородностей геометрического характера, соизмеримых с длинами волн падающего излучения.

Таблица 2

Параметры шероховатости поверхности после обработки

Вид обработки	Параметры шероховатости и излучательных свойств после обработки		
	$1 - \frac{R_a}{2H_{i\min}}$	$\rho$	$\epsilon$
Тонкое точение алмазным инструментом	0,926-0,953	0,75-0,87	0,07
Выглаживание шаром (диаметром 6мм из ШХ15)	0,95	0,98	0,05
Механическое полирование (окись хрома МЗ)	0,9-0,95	0,6-0,75	0,06-0,07
Точение	0,9	0,48-0,54	0,09-0,12
Фрезерование	0,88-0,89	0,47-0,61	0,15-0,18
Без обработки (прокат)	0,896	0,4-0,6	0,14-0,16
Гидроабразивная или обработка металлической дробью	0,84-0,89	0,35-0,4	0,3-0,32

Изучение и анализ профилограмм поверхностей образцов листового проката из сплава АМг6 после различных обработок позволили оценить в первом приближении (табл.2) форму неровностей по профилограммам с учетом микронеровностей порядка 10-50 мкм. Оценку производили по формуле (1). Шероховатость и излучательные свойства (отражательную  $\rho$  и излучательную  $\epsilon$  способности) обработанных поверхностей изучали с применением профилографа-профилометра мод. 252, оптического МИМ-7 и электронно-

го ЭМВ 100Л микроскопов, фотометра ФМ59 и терморadiометра ТИС.

Коэффициент  $F'$ , (определяемый с использованием профилометра - профилографа мод. 252) лишь частично отражает форму микронеровностей, соизмеримых с длинами волн падающего солнечного излучения, так как разрушения от воздействия иглы профилометра соизмеримы с этими микронеровностями. В результатах экспериментов наблюдается соответствие интенсивности изменения коэффициента формы профилограмм изменению отражательной способности обработанных поверхностей для соответствующего технологического маршрута. При каждом методе обработки можно выделить несколько узких интервалов распределения размеров микронеровностей, часть которых соответствует диапазону длин волн падающего излучения.

Максимальные значения характеристики формы неровностей достигаются после точения алмазным инструментом, выглаживания и механического полирования ( $R_a=0,02-0,1$  мкм). С увеличением высоты неровностей на обработанной поверхности значения характеристики формы уменьшаются, начинает сказываться влияние взаимного расположения уклонов неровностей, значительно уменьшаются углы и радиусы. Так, для поверхностей после гидроабразивной обработки характерно наличие неровностей различных порядков малости, а углы между уклонами (радиус ошупывающей иглы профилографа 10 мкм) уменьшаются до  $90^\circ$ . В поверхностном слое после обработки наблюдается закрепление абразивных зерен, что оказывает влияние на излучательные свойства поверхностей.

Точение алмазным инструментом поверхностей алюминиевых сплавов, при достижении высокой отражательной способности, предпочтительно перед механическим полированием. Повышению отражательной способности поверхностей, обработанных точением алмазным инструментом (резцом из природного алмаза без применения СОЖ), способствуют: благоприятное сочетание физико-химических свойств природного алмаза и обрабатываемой поверхности, снижение интенсивности воздействия химически активных веществ при отсутствии СОЖ. Это и приводит к уменьшению количества неоднородностей, различных по характеру. Такие поверхности имеют менее развитую структуру, чем после механического полирования.

Изучение профилограмм и фотографий поверхности различных увеличений позволило установить на всех стадиях обработки изменения как высоты неровностей, так и их формы, причем, окисление поверхности происходит в меньшей степени при точении, выглаживании и фрезеровании. В случае фрезерования изменение режимов обработки и соответствующих высотных параметров шероховатости ( $R_z=2-45$  мкм) не оказало существенного влияния на отражательную способность. Это можно объяснить соответствием физико-химических свойств обработанных поверхностей и наличием аналогичных неоднородностей геометрического характера, соизмеримых с длинами волн падающего излучения.



Уменьшение отражательной способности и увеличение излучательной наиболее эффективно обеспечивается в случае применения гидроабразивной обработки. Этому способствует повышенная активность поверхности с ее наклепом, развитым рельефом и окисной пленкой.

Аналогичные результаты наблюдаем при обработке поверхности алюминиевого сплава АМг 6 (табл.3).

Результаты исследований указывают на возможность изменения отражательной способности поверхностей (после обработки резанием) в значительных пределах (40- 87 %) и излучательной - в незначительных (5- 16 %).

Максимальные значения критерия шероховатости поверхности  $F'$  (при применении алмазного инструмента) достигаются точением, выглаживанием и абразивным полированием.

Результаты исследований подтверждают преимущество точения алмазным инструментом (особенно из природного алмаза) перед абразивным полированием поверхностей с высокой отражательной способностью.

Таблица 3

Значения параметров шероховатости поверхности и излучательных свойств поверхностей образцов из проката алюминиевого сплава АМг 6 после различных методов обработки

Вид обработки	Высота неровностей, $R_a$ , мкм	Критерий шероховатости, $F'$	Кoeff. отражения, $\rho_s$	Кoeff. излучения, $\varepsilon$	КРП, мВ.
Исходный (прокат)	0,35	0,896	0,4	0,16	890
Фрезерование	1,6	0,89	0,47	0,15	100
Струйно-абразивная	0,9	0,84	0,4	0,16	260
Точение	0,56	0,91	0,48	0,07	1050
Выглаживание шаром	0,1	0,93	0,8	0,05	1020
Абразивное полирование	0,1	0,967	0,75	0,06	120
Тонкое точение алмазным инструментом	0,1	0,953	0,87	0,07	200

Повышению отражательной способности поверхностей, обработанных точением, способствует благоприятное сочетание физико-химических свойств природного алмаза и материала обрабатываемой поверхности, снижение интенсивности воздействия химически активных веществ, что приводит к уменьшению различного характера неоднородностей. Окисление поверхности при точении происходит в меньшей степени, чем при абразивном

полировании. При полировании поверхность адсорбирует химически активные вещества, содержащиеся в пастах, и кислород воздуха, что оказывает влияние на развитие химико-механических явлений, сопровождающих пластическое деформирование микровыступов поверхности. Процесс адсорбции должен интенсифицироваться при механическом снятии пленок окислов с поверхности, что обеспечивается относительным перемещением полировальника и обрабатываемой поверхности. Локальное активное контактирование поверхностей полировальника и обрабатываемой поверхности обеспечивает срыв пленки окислов, ее образование, сопровождающееся адсорбцией химически активных веществ, и последующий срыв. В результате множества локальных воздействий происходит уменьшение высот неровностей, что подтверждается сглаживанием профиля шероховатости поверхности.

Значительные различия поверхностей после точения и полирования подтверждаются (табл. 3) оценкой работы выхода электронов (КРП). При равных значениях высотных параметров шероховатости поверхности ( $R_z = 0,05 \dots 0,08$  мкм) образцы из сплава АМг4 после полирования и точения имели отражательную способность 90% и 53% соответственно, излучательную - 7% и 8%, КРП - 1230 мВ и 800 мВ. После полирования, кроме следов абразивных зерен, на поверхности образцов иногда наблюдали большое количество мелких точек ("ряби"), что является, по-видимому, результатом взаимодействия в условиях повышенных температур органических компонентов полирующих составов, абразивных зерен и материала обрабатываемой поверхности. На поверхности, обработанной точением, наблюдали следы реза глубиной 0,2 мкм и шириной 60 мкм, уклоны микронеровностей относительно гладкие.

Рентгенографические исследования показывают, что после полирования поверхность деформирована в большей степени и структуру поверхностного слоя можно представить схематически как конгломерат сильно раздробленных осколков зерен, среди которых встречаются и крупные осколки сильно деформированных зерен. После точения зерна более крупные с небольшими, в отдельных местах, включениями измельченных осколков. Меньшей степени деформации обработанной поверхности способствует более низкая теплонпряженность процесса точения алмазным инструментом по сравнению с процессом полирования.

Снижение отражательной и увеличение излучательной способности наиболее эффективно обеспечивается струйно-абразивной обработкой. С увеличением высоты неровностей на обработанной поверхности значения критерия шероховатости уменьшаются, начинает сказываться влияние взаимного расположения уклонов неровностей, значительно уменьшаются углы и радиусы. Так, для поверхностей после гидроабразивной обработки характерно наличие неровностей различных порядков малости (струйные методы обработки свободным абразивом отличает больший диапазон рассеивания размеров), а углы между уклонами уменьшаются до  $90^\circ$ . В поверхностном слое образцов на-

блюдается закрепление зерен обрабатывающей среды, что оказывает влияние на оптические характеристики обработанной поверхности.

Контроль шероховатости обработанных поверхностей показал возможность непосредственного извлечения информации о форме неровностей при ощупывании иглой профилометра-профилографа. Следует отметить, что критерий шероховатости поверхности  $F'$ , определяемый с использованием щуповых приборов, лишь частично отражает форму неровностей, соизмеримых с длинами волн падающего излучения (видимого диапазона), так как разрушения от воздействия иглы соизмеримы с анализируемыми неровностями. Для неровностей поверхности, соизмеримых с длинами волн собственного излучения, точность оценки повышается. Для большинства технологических операций окончательной обработки поверхностей форма неровностей, соизмеримых с длинами волн падающего излучения, частично будет определяться окислением поверхностного слоя в процессе обработки. Оценка формы таких неровностей контактными методами затруднена и не обеспечивает достоверных результатов, что подтверждается исследованием топографии на оптических и электронных микроскопах.

Физические и химические неоднородности поверхностного слоя после различных методов обработки отличаются не только природой, но и количеством, размерами, о чем свидетельствует анализ спектральной отражательной способности (наблюдается характерный сдвиг максимумов отражательной способности по длинам волн и по интенсивности отражения), оценки выхода электронов (КРП) и шероховатости поверхности. Для каждого метода обработки можно выделить несколько узких интервалов распределения размеров неровностей, часть их размеров соответствует диапазону длин волн падающего излучения.

Список литературы: 1. *Шкурутий В.Г., Шкурутий Ю.В.* Технологическое обеспечение оптических свойств поверхностей тонкостенных деталей. – Труды Одесского политехнического ун-та. – Одесса, 2001. – Вып.5. – С. 56-61. 2. *Новоселов Ю.К.* Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 232 с. 3. *Королев А.В.* Исследования процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 185 с. 4. *Резников А.Н., Федосеев О.Б.* Выбор режимов шлифования синтетическими сверхтвёрдыми материалами при заданной шероховатости поверхности изделия. – Вестник машиностроения, 1976, №6. – С. 69-70. 5. *Новиков Ф.В.* Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования. – Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Одесса: ОГПУ, 1995. – 36 с. 6. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией *Ф.В. Новикова и А.В. Якимова*. В десяти томах. – Т.4. “Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов”. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.