

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

1. Основные понятия и определения

Шероховатость поверхности — это совокупность неровностей с относительно малыми шагами, выделенная, например, с помощью базовой длины.

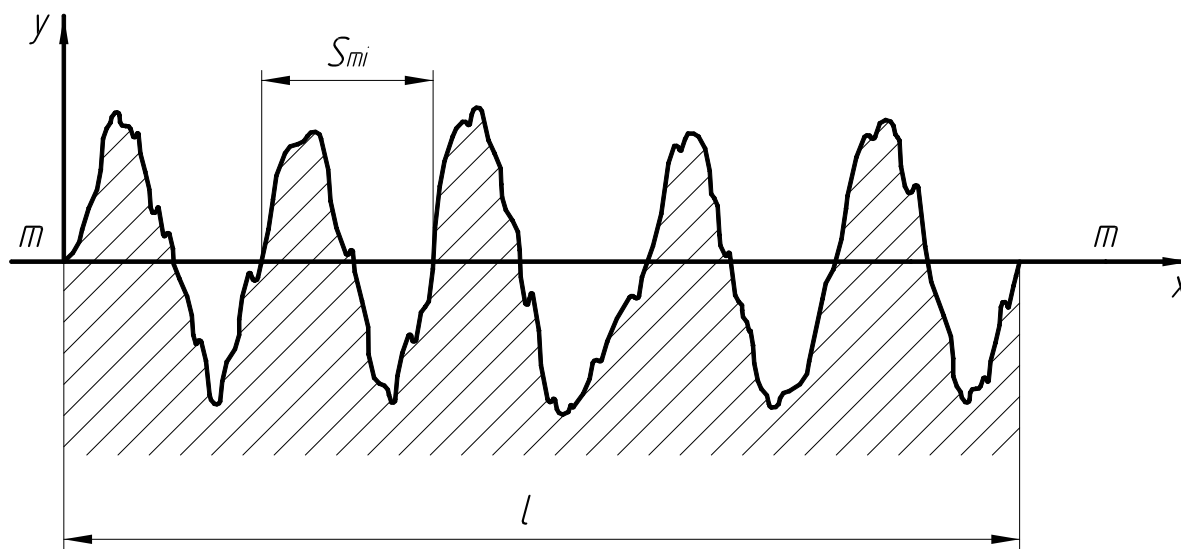


Рис.1

К шероховатости поверхности относят неровности, для которых выполняется условие $\frac{S}{R} < 50$, где R — высота неровностей, S — шаг неровностей. Неровности, для которых $50 \leq \frac{S}{R} \leq 1000$, относят к волнистости, а неровности, для которых $\frac{S}{R} > 1000$ — к отклонению формы поверхности. Следует подчеркнуть, что четкой границы между шероховатостью, волнистостью и отклонениями формы не существует.

Для отделения шероховатости от других неровностей с относительно большими шагами (отклонений формы и волнистости) ее рассматривают в пределах ограниченного участка, длина которого называется **базовой длиной**.

Рис.2

Для обеспечения единства значения базовых длин стандартизированы и выбираются из ряда: 0,01; 0,03; 0,08; 0,25; **0,8; 2,5**; 8; 25мм.

Выбор значений базовой длины производится в зависимости от функционального назначения поверхности.

Параметры микрогеометрии – шероховатости – определяются технологическим процессом. Шероховатость поверхности образуется в результате копирования режущих кромок инструмента, вырывания частиц материала с поверхности детали, пластических деформаций поверхностного слоя при образовании стружки, вибрации детали и инструмента и других причин.

Рис.3

Шероховатость поверхности оказывает большое влияние на функциональные параметры машин и приборов. Например, шероховатость поверхности влияет на контактную жесткость соприкасающихся поверхностей; трение и износ трущихся поверхностей; гидравлическое и электрическое сопротивление; лазерную стойкость оптических элементов, отражательную способность; допустимую плотность записи информации в магнитных запоминающих устройствах.

Поэтому шероховатость поверхности нормируют отдельно от отклонений размеров, формы и расположения поверхностей.

2. Нормирование шероховатости поверхности

Требования к шероховатости устанавливают указанием параметров шероховатости, числовых значений этих параметров и числовых значений базовых длин, а при необходимости также типа направлений неровностей поверхности и способа обработки.

Реальные поверхности представляют собой трехмерные геометрические структуры. Однако анализ, нормирование и оценку реальных поверхностей обычно сводят к анализу и оценке двумерных характеристик поверхности, т.е. к анализу и оценке профилей поверхности, что обусловлено методикой исследования и измерения геометрии поверхности.

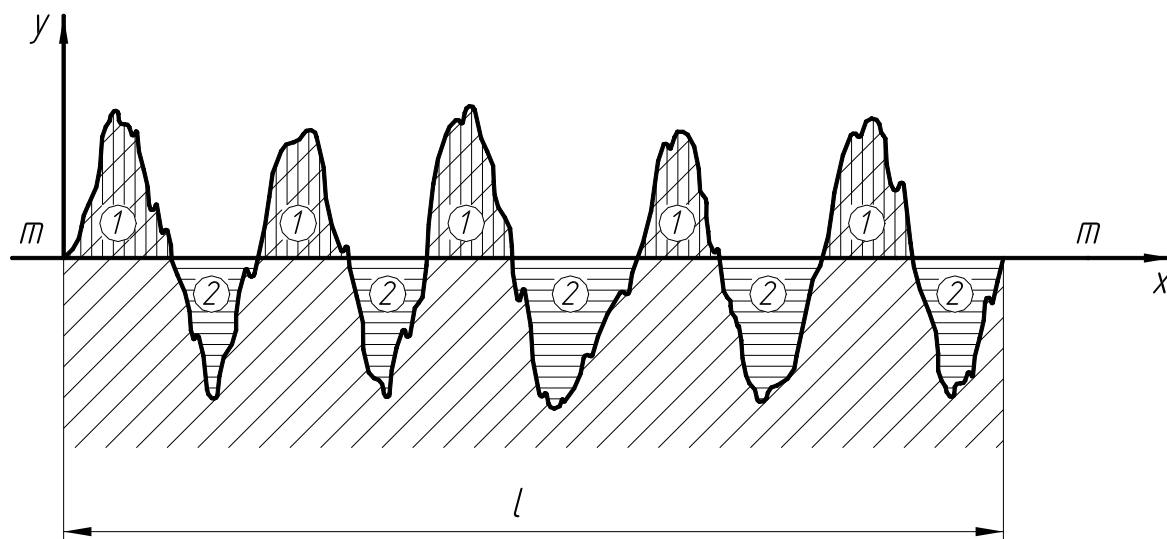


Рис.4

На рис.4 представлена профиллограмма, т.е. отображение реального профиля, полученного с помощью измерительного прибора. При анализе следует учитывать, что изображение профиля на профиллограмме получается несколько искаженным, так как увеличение по вертикали (100...200 000) всегда больше, чем по горизонтали (10...10 000).

В соответствии с ГОСТ 2789-73 в основу нормирования и оценки шероховатости поверхности положена система средней линии профиля (система М). Разработана также система нормирования и оценки шероховатости поверхности, основанная на использовании огибающей профиль линии – система Е. Однако система Е не получила широкого применения, так как при реализации этой системы должны использоваться более сложные средства измерения.

Средняя линия профиля *m-m* – это базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины l среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} = \min.$$

Приближенно среднюю линию на профиллограммах проводят так, чтобы сумма площадей выступов и впадин, расположенных над этой линией и под ней, были равны (см. рис.4).

$$\sum_{i=1}^n F_i = \sum_{i=1}^n F'_i$$

Для количественной оценки шероховатости предусмотрены 3 группы параметров.

1) Высотные параметры шероховатости

- **среднее арифметическое отклонение профиля Ra** – среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

или

$$Ra \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|,$$

где y – отклонение профиля, т.е. расстояние между точкой профиля и средней линией; l – базовая длина; n - число суммируемых отклонений профиля.

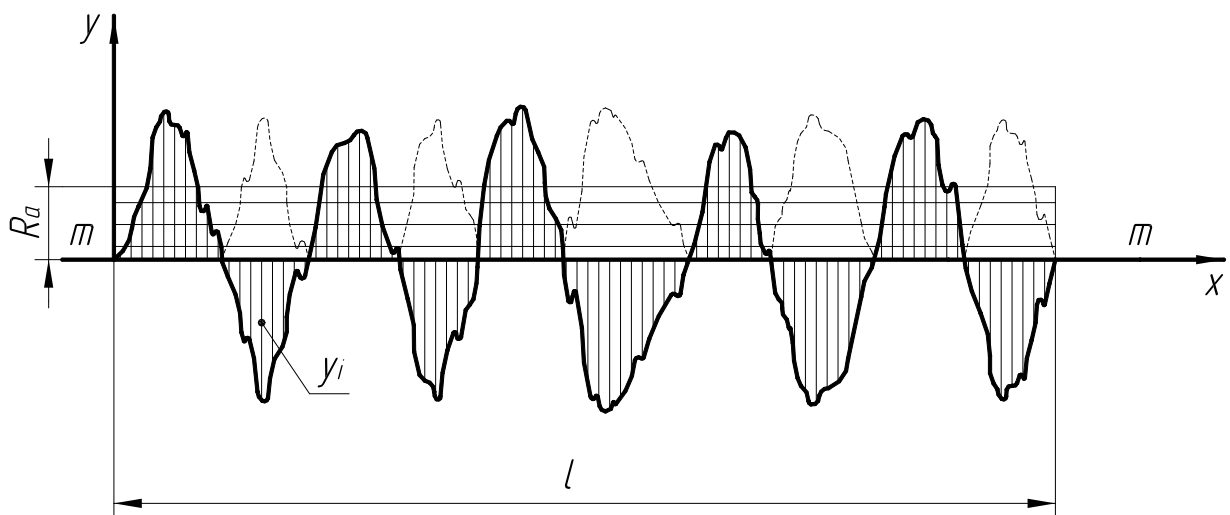


Рис.5

Среднее арифметическое отклонение равно высоте прямоугольника с длиной l , площадь которого равна сумме площадей выступов и впадин.

Параметр Ra является предпочтительным, причем предпочтительность – метрологическая. Параметр Ra определяется с наибольшей надежностью по сравнению с другими параметрами и получил наибольшее применение для нормирования и оценки шероховатости поверхности. Однако параметр Ra практически не связан с формой неровностей и функциональными свойствами поверхности, что является его основным недостатком.

Числовые значения параметра Ra установлены в пределах от 0,008 мкм до 100 мкм по ряду R10 ($\phi = 1,25$).

- **высота неровностей профиля по десяти точкам Rz** – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины (рис.6)

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |y_{p_i}| + \sum_{i=1}^5 |y_{v_i}| ,$$

где y_{p_i} - высота i -го наибольшего выступа профиля; y_{v_i} - глубина i -й наибольшей впадины профиля.

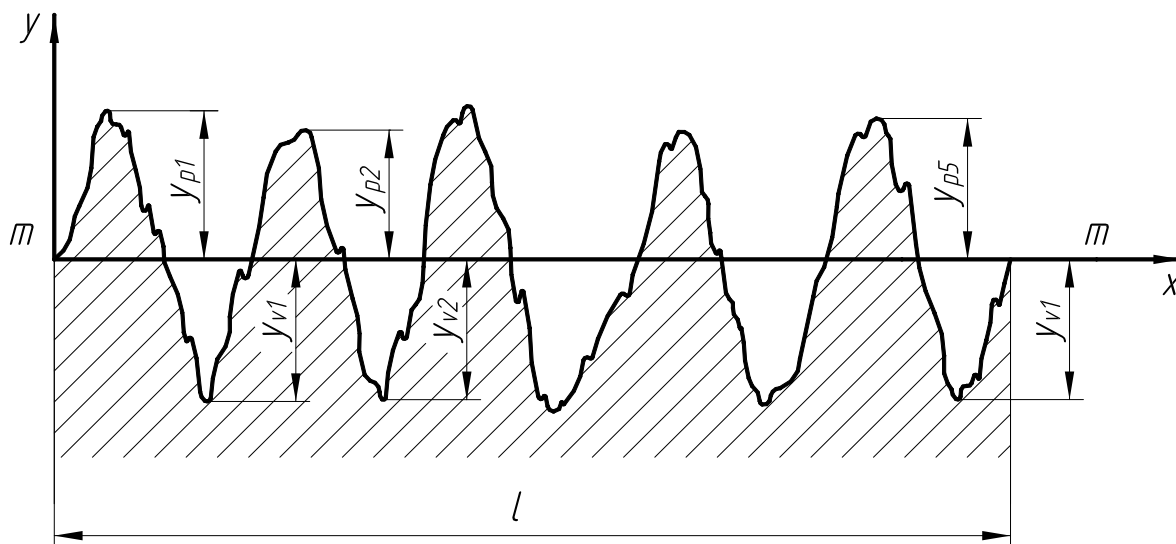


Рис.6

Для средней линии, имеющей форму отрезка прямой, то ординаты вершин и впадин можно определять от любой прямой линии, параллельной средней и нигде не пересекающей профиль.

$$Rz = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 h_{i \max} - \sum_{i=1}^5 h_{i \min} .$$

где $h_{i \max}$ – расстояние от высшей точки i -го наибольшего выступа профиля до линии, параллельной средней и не пересекающей профиль; $h_{i \min}$ – расстояние от низшей точки i -й наибольшей впадины профиля до этой же линии.

Параметр также практически не отражает форму неровностей и функциональные свойства поверхностей. Например, поверхности 1 и 2 (рис.7) имеют разные функциональные свойства, а значения параметров Ra и Rz у них одинаковые.

Рис.7

Числовые значения параметра Rz установлены от 0,025 мкм до 1600 мкм из ряда R10.

- **наибольшая высота неровностей профиля R_{max}** – расстояние между линией выступов и линией впадин профиля в пределах базовой длины (рис.8)

$$R_{max} = |R_p| + |R_v|,$$

где R_p - высота наибольшего выступа профиля; R_v - глубина наибольшей впадины профиля.

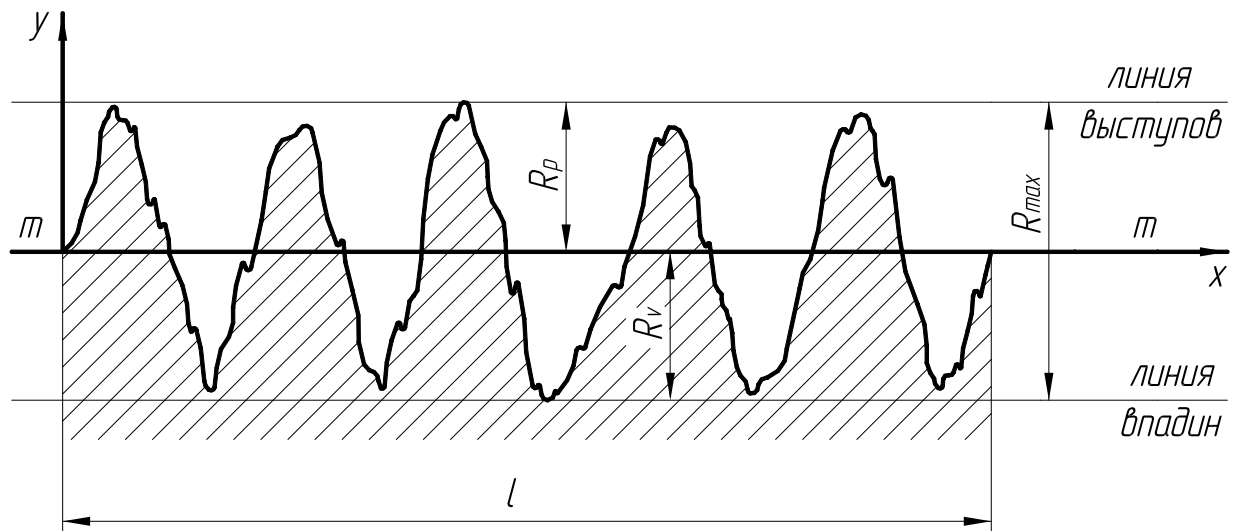


Рис.8

Линия выступов профиля проходит через высшую в пределах базовой длины точку профиля эквидистантно средней линии, а линии впадин - через низшую в пределах базовой длины точку профиля.

Числовые значения параметра R_{max} установлены от 0,025 мкм до 1600 мкм из ряда R10.

Таким образом, параметры R_a , R_z оценивают среднюю высоту микронеровностей профиля, а параметр R_{max} – полную высоту профиля, характеризуя толщину слоя, затронутого обработкой.

2) Шаговые параметры шероховатости

- **средний шаг неровностей профиля S_m** – среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{m_i}.$$

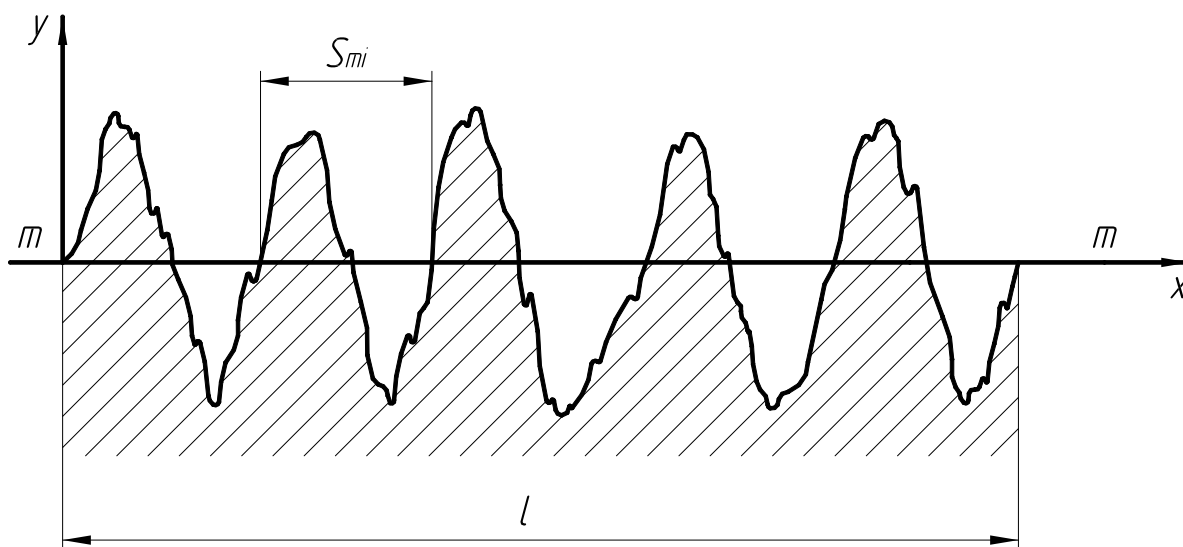


Рис.9

- *средний шаг местных выступов профиля S* (средний шаг по вершинам)

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$$

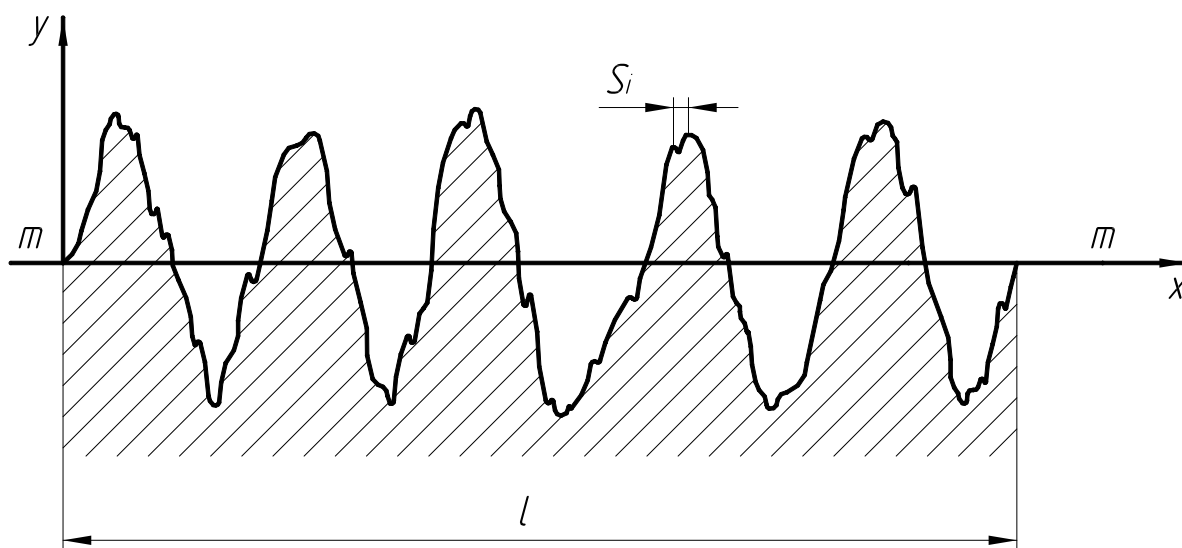


Рис.10

Числовые значения параметров S_m и S установлены от 0,002 мм до 12.% мм из ряда R10.

3) Параметр формы шероховатости

- *относительная опорная длина профиля t_p* - это отношение опорной длины профиля η_p к базовой длине l

$$t_p = \frac{\eta_p}{l}$$

где η_p – это опорная длина профиля, равная сумме длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии, в пределах базовой длины (рис.11)

$$\eta_p = \sum_{i=1}^n b_i.$$

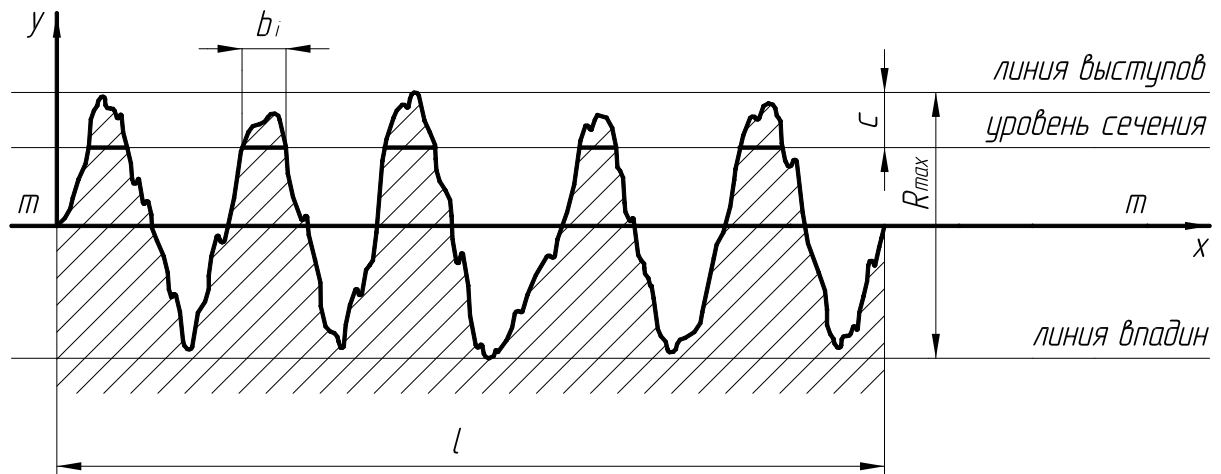


Рис.11

Опорная длина профиля η_p определяется на уровне сечения профиля p , задаваемом в процентах от наибольшей высоты неровностей профиля R_{\max} :

$$p = \frac{C}{R_{\max}} 100\%,$$

где C – расстояние в мкм между линией выступов и заданным уровнем сечения профиля.

Относительная опорная длина профиля t_p показывает, какую часть базовой длины занимает материал профиля на заданном уровне. Значение t_p определяет фактическую площадь контакта после приработки поверхностей.

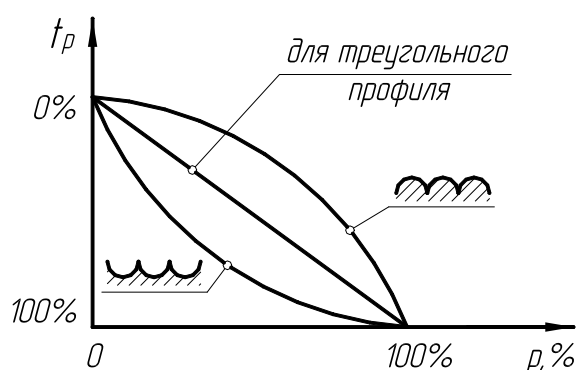


Рис.12

На рис.12 приведен примерный вид относительных опорных кривых для трех видов шероховатости поверхности с одинаковой наибольшей высотой неровностей. Чем острее вершины выступов, тем меньше, при прочих равных условиях, износостойкость такой поверхности (например, при $p = 40\%$ t_p соответственно равно 10, 38 и 80 %, см. рис. 12).

Относительная опорная длина профиля t_p и уровень сечения профиля p задаются в процентах. Значения относительной опорной длины профиля t_p выбирают из ряда: 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 %. Числовые значения p выбирают из того же ряда, начиная с 5 %.

Пример. Сравнить значения параметров шероховатости для двух профилей, представленных на рис.13.

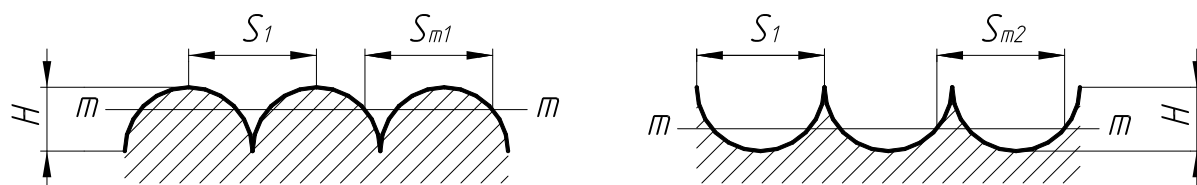


Рис.13

Решение. Для двух представленных профилей, имеющих одинаковую высоту H , но разную форму, все параметры шероховатости имеют одинаковое значение, кроме параметра t_p

$$Ra_1 = Ra_2; \quad Sm_1 = Sm_2;$$

$$Rz_1 = Rz_2 = H; \quad S_1 = S_2;$$

$$R_{\max 1} = R_{\max 2} = H; \quad t_{10}^1 > t_{10}^2.$$

Таким образом, только параметр t_p позволяет различить эти профили, а с точки зрения остальных параметров оба профиля одинаковы.

Выбор требований к шероховатости поверхности

Требования к шероховатости поверхности устанавливают указанием параметров шероховатости поверхности, числовых значений этих параметров и числовых значений базовых длин, а при необходимости также типа направлений неровностей поверхности и вида обработки.

Выбор параметров для нормирования шероховатости должен производиться с учетом функционального назначения и эксплуатационных свойств поверхности. Наиболее часто используются высотные параметры шероховатости, из которых предпочтительным является параметр Ra , определяемый по всем точкам профиля и потому более полно отражающий

отклонение профиля по сравнению с параметрами Rz и R_{max} . Он удобен для измерения профилометрами и получил наибольшее распространение в зарубежной технической документации. Параметры Rz и R_{max} нормируют в тех случаях, когда надо ограничить полную высоту неровностей профиля или когда контроль параметра Ra невозможен в виду малых размеров или сложной конфигурации поверхности (например, режущие кромки инструментов, радиотехнические детали и т.д.).

Для наиболее полного обеспечения требуемых функциональных свойств ответственных поверхностей кроме высотных параметров указывают шаговые параметры Sm и S или параметр формы t_p . Шаговые параметры Sm и S влияют на виброустойчивость, прочность при циклических нагрузках, сопротивление в волноводах. С параметром t_p связаны такие важные эксплуатационные свойства как износостойкость трущихся поверхностей, контактная жесткость, герметичность соединений.

Направление неровностей нормируется в случаях, связанных с направлением относительного перемещения трущихся сопряженных поверхностей или с направлением движения струи жидкости или газа относительно поверхности, а также для обеспечения виброустойчивости и прочности при циклических нагрузках.

Примеры выбора параметров шероховатости в зависимости от эксплуатационных требований к поверхности приведены в табл.1.

Таблица 1

Эксплуатационные требования	Нормируемые параметры шероховатости
Износостойкость	Ra (Rz), t_p и направление неровностей
Виброустойчивость	Ra (Rz), Sm , S и направление неровностей
Контактная жесткость	Ra (Rz), t_p
Прочность соединений	Ra (Rz)
Прочность при циклической нагрузке	R_{max} , Sm , S и направление неровностей
Герметичность соединений	Ra (Rz), R_{max} , t_p
Сопротивление в волноводах	Ra , Sm , S

Выбор числовых значений параметров шероховатости должен производиться в соответствии с условиями работы и эксплуатационными требованиями к поверхности. Например, при большой высоте микронеровностей может произойти разрыв масляной пленки в подшипниках скольжения со смазкой. В этом случае следует ограничивать наибольшее значение параметра шероховатости Ra 0,4 мкм.

В некоторых случаях необходимо устанавливать два предельных значения параметра. Например, при высоте микронеровностей керамических

подложек гибридных интегральных схем ($R_z > 2$ мкм) наблюдается большой разброс электрических параметров пленочных элементов схем (в частности сопротивлений резисторов). Однако при малой высоте микронеровностей ($R_z < 0,2$ мкм) происходит отслаивание напыленной пленки из-за плохой адгезии. Поэтому шероховатость поверхности подложки нормируется значениями $0,2 \text{ мкм} \leq R_z \leq 2 \text{ мкм}$.

Определенные ограничения шероховатости связаны с допуском размера T и допуском формы TF нормируемой поверхности. Однозначной связи между этими величинами нет. При низких требованиях к точности размера и формы могут устанавливаться высокие требования к шероховатости поверхности (например, для поверхностей рукояток, маховиков, кнопок $Ra \leq (0,4 \dots 1,6)$ мкм с указанием полирования или покрытия). Однако изменение шероховатости при сборке и эксплуатации в результате смятия и сглаживания микронеровностей может привести к изменениям размера и формы.

Имеются рекомендации по выбору наибольших предельных значений параметр Ra в зависимости от допуска размера и формы для разных уровней относительной геометрической точности (табл.2).

Установлено три уровня относительной геометрической точности:

- нормальная относительная точность (уровень А);
- повышенная относительная точность (уровень В);
- высокая относительная точность (уровень С).

Таблица 2

Уровень точности	Шероховатость в зависимости от допуска размера T	
	Ra	Rz
А	$0,05 T$	$0,2 T$
В	$0,025 T$	$0,1 T$
С	$0,012 T$	$0,05 T$

При заданном допуске формы TF

$$Ra \leq 0,15 TF ; \quad Rz \leq 0,6 T.$$

При заданном допуске биения (радиального, торцового) TC

$$Ra \leq 0,1 TC ; \quad Rz \leq 0,4 TC.$$

Если допуск формы не указан, то

$$Ra \leq 0,1 T.$$

Для особо высокой относительной точности (допуск формы составляет менее 25 % T)

$$Ra \leq 0,1 TF.$$

Расчетные значения параметров шероховатости округляются и должны соответствовать рекомендуемым значениям, приведенным в ГОСТе.

При выборе числовых значений параметров шероховатости следует учитывать и возможность обеспечения заданных требований рациональными методами обработки. Повышение требований к шероховатости приводит к увеличению затрат на обработку, которое может быть оправдано улучшением качества поверхности. В табл. приведены значения параметров Ra , достижимые при различных способах обработки.

Выбор базовой длины.

Выбор значений базовой длины производится в зависимости от функционального назначения поверхности.

В приложении к ГОСТ 2789-73 приведены значения базовых длин, рекомендуемые для параметров Ra , Rz , R_{max} . Эти рекомендации отражают стабильную связь между шагами и высотой неровностей для большинства известных технологических процессов. Для других параметров шероховатости, нормируемых вместе с высотными параметрами, следует, как правило, применять те же базовые длины, что и для высотных параметров.

В отдельных случаях, исходя из функциональных требований или с учетом особенностей технологического процесса, конструктор может назначать другое значение базовой длины, выбирая его из стандартного ряда.

При выборе значений базовой длины следует учитывать, что в пределах базовой длины должно располагаться не менее пяти вершин и пяти впадин.

Обозначение шероховатости на чертежах

Шероховатость поверхностей обозначают для всех выполняемых по данному чертежу поверхностей изделия, независимо от методов их образования, кроме поверхностей, шероховатость которых не обусловлена требованиями конструкции.

Общая структура обозначения шероховатости представлена на рис.

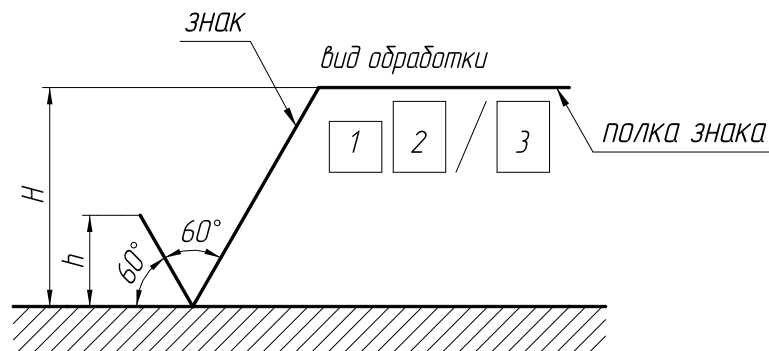


Рис.14

1 – направление неровностей; 2 – базовая длина; 3 – параметры шероховатости и их значения.

Высота h равна высоте шрифта на чертеже.

$$H = (1,5...3) h.$$

Толщина линий знака шероховатости должна быть приблизительно равна половине толщины сплошной основной линии, применяемой на чертеже.

В обозначении шероховатости поверхности используют один из знаков шероховатости, указанных на рис.15.

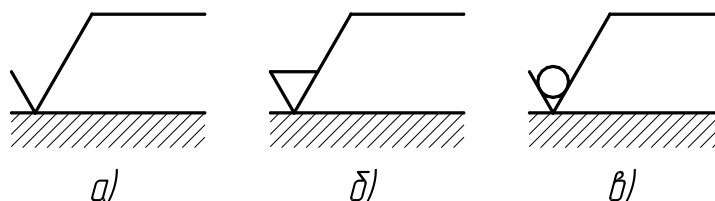


Рис.15. Знаки шероховатости поверхности

Знак (рис.15,а) используется в обозначении шероховатости поверхности, способ обработки которой конструктором не устанавливается.

Знак (рис.15,б) используется в обозначении шероховатости поверхности, которая должна быть образована только удалением слоя материала (например, точением, фрезерованием, сверлением, шлифованием).

Знак (рис.15,в) (с указанием параметров шероховатости и их числовых значений) используется в обозначении шероховатости поверхности, которая должна быть образована без удаления слоя материала, например, литьем, ковкой, прокаткой и т.п. Этот знак (без указания параметров шероховатости) проставляют на поверхностях, не обрабатываемых по данному чертежу, т.е. сохраняемых в состоянии поставки.

Значение параметра шероховатости указывают в обозначении шероховатости после соответствующего символа:

$Ra\ 0,4; Rz\ 50; R_{max}\ 6,3 \rightarrow$ в микрометрах;

$Sm\ 0,63; S\ 0,032 \rightarrow$ в миллиметрах;

$t_{50}\ 70 \rightarrow$ в процентах.

Требования к шероховатости поверхности устанавливают:

- указанием одного предельного значения, как правило, наибольшего, например:

$$\sqrt{Rz10} \rightarrow Rz\ 10\text{мкм};$$

$$\sqrt{t_{20}60} \rightarrow t_{20}\ 60\%;$$

- указанием допустимого диапазона значений параметра, задаваемого либо двумя предельными значениями, которые могут задаваться следующими способами:

$$\text{а) } \sqrt{\begin{matrix} Ra\ 3,20 \\ 0,32 \end{matrix}} \rightarrow 0,32\text{мкм } Ra\ 3,20\text{мкм};$$

$$\text{б) } \sqrt{Rz10^{+10\%}} \rightarrow 10\text{мкм } Rz\ 12\text{мкм}$$

Отклонения номинального значения могут быть как одно-, так и двусторонними:

$$\sqrt{Rz10 \pm 10\%} \rightarrow 9\text{мкм } Rz\ 11\text{мкм};$$

$$\sqrt{Rz10_{-20\%}} \rightarrow 8\text{мкм } Rz\ 10\text{мкм}.$$

При указании двух и более параметров шероховатости в обозначении их записывают сверху вниз в следующем порядке:

- высотный параметр;
- шаговый параметр;
- параметр формы.

Пример.

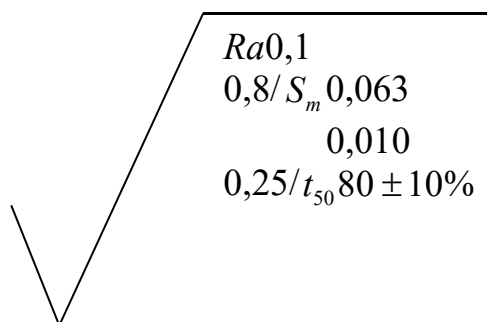


Рис.16

Данное обозначение означает, что:

Ra 0,1 мкм на базовой длине $l = 0,25$ мм, соответствующей рекомендациям ГОСТа;

0,010мм S_m 0,063мм на базовой длине $l = 0,8$ мм;

72% t_p 88% на базовой длине $l = 0,25$ мм.

Базовую длину в обозначении шероховатости поверхности не указывают, если требования к шероховатости нормируют высотными параметрами Ra , Rz или $Rmax$ и определение параметров производится на базовой длине, приведенной в приложении к ГОСТ 2789-73. Для шаговых параметров S_m и S и параметра формы t_p базовую длину указывать обязательно.

Вид обработки поверхности указывают в обозначении шероховатости только в случаях, когда он является единственным для получения требуемого качества поверхности (рис.17).

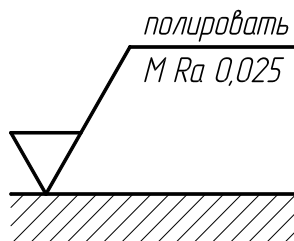



Рис.17

В некоторых случаях (например, для трущихся поверхностей, при протекании жидкости в трубе и т.д.) устанавливают требования к направлению неровностей поверхности. Стандартные условные обозначения направлений неровностей приведены в табл.3. (направление неровностей рассматривается по отношению к линии, изображающей на чертеже поверхность, или к точке, изображающей центр сечения).

Таблица 3

Обозначение направления рисок	Типы направления неровностей	Схематическое изображение
=	Параллельное	
<i>f</i>	Перпендикулярное	
×	Перекрещивающееся	
R	Радиальное	
C	Круговое	
M	Произвольное	

Р	Точечное	
---	----------	---

Обозначение шероховатости поверхностей на изображении изделия располагают на линиях контура, выносных линиях (по возможности ближе к размерной линии) или на полках линий – выносок (рис.18). При недостатке места допускается располагать обозначения шероховатости на размерных линиях или на их продолжениях, на рамке допуска формы, а также разрывать выносную линию.

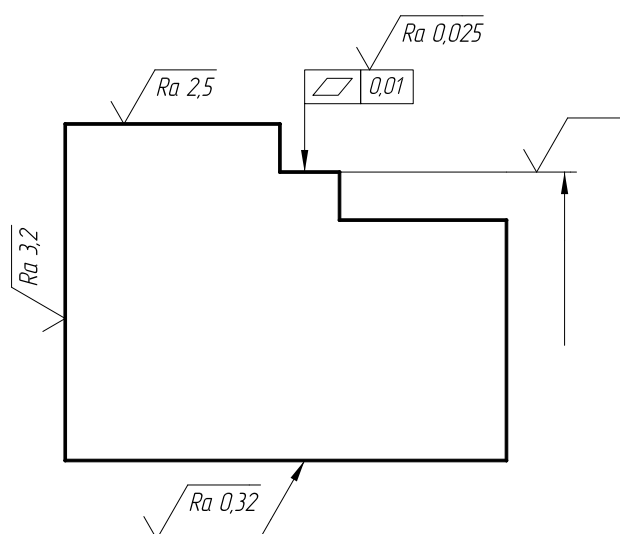


Рис.18

При указании одинаковой шероховатости для всех поверхностей изделия обозначение шероховатости помещают в правый верхний угол чертежа и на изображении не наносят (рис.19).

Размеры и толщина линий знака в обозначении шероховатости, вынесенном в правый верхний угол чертежа, должны быть в 1,5 раза больше, чем в обозначениях, нанесенных на изображении.

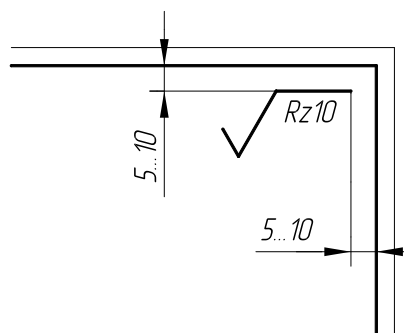


Рис.19

При указании одинаковой шероховатости для части поверхностей изделия в правом верхнем углу чертежа помещают обозначение одинаковой шероховатости вместе с условным обозначением (рис.20).

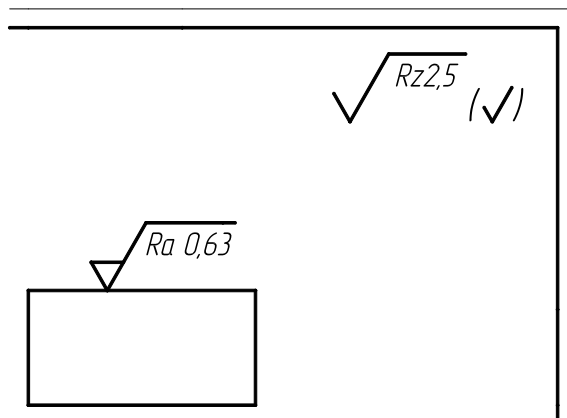





Рис.20

Это означает, что все поверхности, на изображении которых не нанесены обозначения шероховатости или знак , должны иметь шероховатость, указанную перед обозначением .

Размеры знака, взятого в скобки, должны быть одинаковыми с размерами знаков, нанесенных на изображении.

Если шероховатость поверхностей, образующих контур, должна быть одинаковой, обозначение шероховатости наносят один раз в соответствии с рис.21. Диаметр вспомогательного знака  - 4...5 мм.

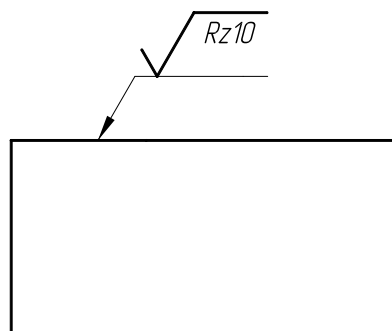


Рис.21