Лекция 10

4. ШЕРОХОВАТОСТЬ И ВОЛНИСТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

4.1. Шероховатость поверхностей

Поверхность любого реального тела и, в первую очередь обработанная, всегда имеет неровности и дефекты, связанные с корпускулярным строением материи и объясняемы реальными возможностями технологических процессов. Функционирование детали начинается со вступлением «в контакт» ее реальной поверхности с другими деталями, внешней средой, оператором. Тем самым состояние поверхности определяет качество функционирования детали.

Проблему качества поверхности обычно рассматривают в нескольких направлениях. Это взаимосвязь свойств поверхности с технологическими показателями, показателями качества изделий (в первую очередь – функционально-эксплуатационными) и с экономическими показателями.

Общим и принципиально важным для всех исследований является то, что они должны базироваться на эффективной системе параметров и характеристик, достаточно полно представляющей свойства реальных поверхностей в форме, удобной для установления норм и их контроля на практике.

Параметры шероховатости являются физическими величинами, определяющими шероховатость, как свойство реальных поверх-

ностей, и составляют метрологическую основу соответствующей области измерений.

Для оценки неровности сравнивают с некоторой линией, принятой за базу. Выбор номинального профиля в качестве базовой линии физически соответствует сравнению шероховатого профиля с идеальным, гладким номинальной формы.

Согласно ГОСТ 2789-73, шероховатостью поверхности называется совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих рельеф поверхности детали и рассматриваемых в пределах базовой длины. Другими словами, это отклонение реального профиля от геометрического (микрогеометрия).

Шероховатость возникает из-за множества причин, связанных с условиями формообразования: пластической деформации поверхностного слоя детали, копирования неровностей режущих кромок инструмента, вибраций системы СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь) и других причин.

Улучшение качества обработки поверхности и уменьшение величины шероховатости ведет к увеличению ресурса детали.

Способы нормирования шероховатости поверхности установлены в ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики» и распространяются на поверхности изделий, изготовленных из любых материалов и любыми методами (кроме ворсистых поверхностей).

В чертежах требования к шероховатости устанавливаются с помощью условных обозначений по ГОСТ 2.309-2011 «ЕСКД. Обозначения шероховатости поверхностей». Изменения, введенные в ГОСТ с мая 2002 г., привели этот стандарт в полное соответствие стандарту ИСО 1302.

Шероховатость оказывает решающее влияние на эксплуатационные свойства машин: износостойкость, коррозионную стойкость, долговечность, прочность и т.д. (рис. 4.1).

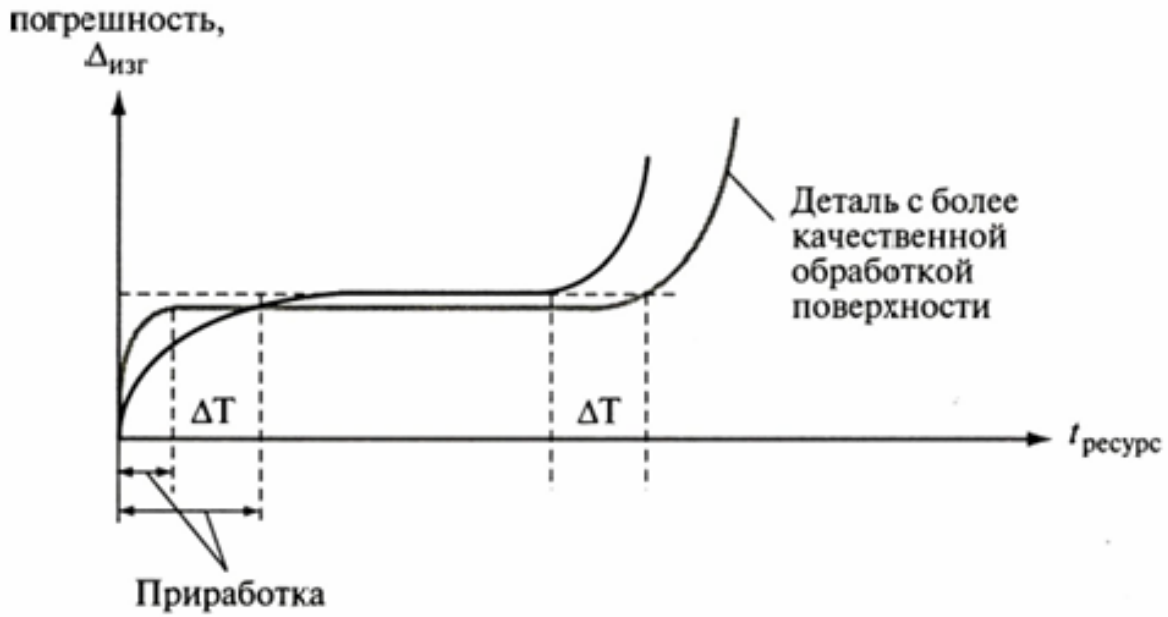


Рис. 4.1. Влияние шероховатости поверхности детали на эксплуатационные свойства машин

На поверхности детали при ее обработке образуются микронеровности (гребешки). Кроме того, в результате обработки на поверхности детали могут возникнуть «прижоги», упрочняющий слой и т.п. Поэтому качество поверхности определяется как микрогеометрией, так и его механическими и физико-химическими характеристиками поверхностного слоя.

ГОСТ 2789-73 не только определил порядок и типы направления неровностей, но и ввел шесть контролируемых параметров шероховатости вместо ранее применяемых двух.

При эксплуатации изделия на показатели функционирования оказывает влияние не вся «работающая» поверхность. Поэтому количественные показатели – параметры, определяющие ее шероховатость, определяют объемную природу шероховатой поверхности.

В разное время были предложены отдельные параметры шероховатости. Практически все они отражали только высотные свойства неровностей профилей.

Если сравнивать шероховатую и идеально гладкую поверхности, каждую точку шероховатой поверхности можно представить как точку гладкой поверхности, отклонившуюся на некоторую величину от начального положения. Направление перемещения совпадает с направлением высот неровностей. Поэтому не случайно первым методом определения шероховатости поверхности стал метод, основанный на использовании параметров неровностей.

Эти параметры, хотя и являются весьма существенными, но не определяют с полнотой, достаточной для практики всех важных свойств поверхности, которые могут быть эффективно использованы для обеспечения заданного качества изделий. Поэтому принципиально важное значение имеет система параметров, обеспечивающая более полное (по сравнению с высотными) описание свойств шероховатости поверхности. Требования к системе таких параметров можно свести к следующим:

✓ параметры должны быть применимы к любым реальным шероховатым поверхностям, т.е. должна быть обеспечена независимость параметров и способов их использования от процессов формирования поверхности, материала детали, конкретных функциональных назначений изделий и показателей качества;

✓ контроль параметров должен быть экономически приемлем и реализуем при помощи достаточно простых средств и методов измерений, в том числе в условиях эксплуатации изделий;

✓ комплект параметров должен достаточно полно (в практическом смысле) и всесторонне отражать свойства шероховатости поверхности (это вытекает из первого требования – применимости при любом функциональном назначении детали и для показателей качества изделия);

✓ система параметров должна иметь преемственность и учитывать уже используемые (особенно стандартизованные) параметры;

✓ параметры должны иметь ясный физический смысл, отражать размерные геометрические свойства неровностей в целях возможности их использования в теоретических разработках.

Так как число разновидностей функционального назначения деталей не ограничено, а шероховатость их поверхностей необходимо оценивать одной и той же системой параметров, эта система должна содержать достаточно полный объем информации о микрогеометрии поверхности (рис. 6.2).

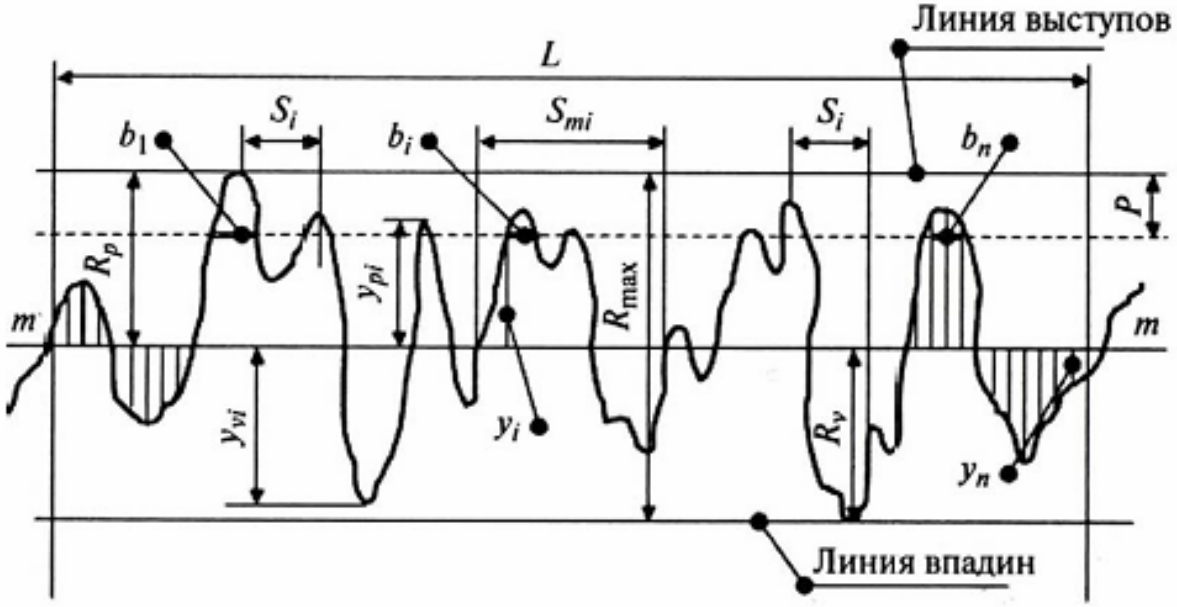


Рис. 4.2. Профилограмма шероховатости поверхности изделия

Система стандартных параметров шероховатости поверхности по ГОСТ 2789–73, определяемых по базовой длине *L*, содержит:

1. Три высотных параметра

- ✓ среднее арифметическое отклонение профиля *Ra;*
- ✓ высоту неровностей профиля по десяти точкам *Rz,*
- ✓ наибольшую высоту профиля *R*max;

2. Два шаговых параметра

- ✓ средний шаг неровностей S_m;
- ✓ средний шаг по вершинам (средний шаг местных выступов) *S*;

3. Параметр шероховатости, связанный с формой неровностей – относительную опорную длину профиля на заданном уровне t_p.

4.2. Параметры шероховатости поверхности

Поскольку удобнее всего оценивать шероховатость «ощупыванием» измеряемой поверхности, лучше всего выполнять эти из-

мерения по линии. Линия, на которой оценивается шероховатость, называется базовой.

Базовая линия – линия заданной геометрической формы, определенным образом проведенная относительно профиля и служащая для оценки геометрических параметров поверхности.

Поверхность, для которой нормируется шероховатость, как бы рассекают плоскостью, перпендикулярной этой поверхности, и получают профиль, в котором проводят линию, эквидистантную номинальному профилю поверхности. Так, если рассекается плоскость, базовая линия будет прямая, если рассекается поверхность сферы, базовая линия будет иметь вид окружности.

Базовая длина L – длина базовой линии, используемая для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности. Числовые значения базовой длины *L* для оценки шероховатости выбирают из ряда (0,01); (0,03); 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8; (25) мм.

Цифры, указываемые в скобках, – нерекомендуемые.

Количественно параметры шероховатости поверхности определяют от единой базы, за которую принята средняя линия профиля. В международной практике такая система отсчета носит название системы *M*.

Для надежной оценки шероховатости с учетом рассеяния показателей прибора о возможной неоднородности строения неровностей длину участка измерения рекомендуется увеличивать до нескольких базовых длин, определяя результат как среднее арифметическое нескольких участков базовой длины *L*.

Средняя линия профиля m – базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в ее пределах среднее квадратичное отклонение профиля y_i до этой линии минимально:

$$\int_0^L y^2 dx = \min .$$

Приближенно средняя линия на профилограммах (записанный прибором профиль реальной поверхности) определяется по равен-

ству сумм площадей, заключенных по обе стороны между ней и линией контура профилограммы.

На профиле различают неровности и выступы. *Неровность* – это часть профиля в пределах тела, заключенная между профилем и прямой, соединяющей два соседних минимума профиля. *Выступ* – часть профиля в пределах тела, расположенная между соседними точками пересечения профиля со средней линией.

Линия выступов профиля – линия, эквидистантная средней линии, проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины.

Линия впадин профиля – линия, эквидистантная средней линии, проходящая через низшую точку профиля в пределах базовой длины.

Наибольшая высота неровностей профиля Rmax – расстояние между линией выступов профиля и линией впадин профиля в пределах базовой длины.

Рассмотрим другие параметры шероховатости.

Среднее арифметическое отклонение профиля Ra – среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины, определяется по формуле

$$Ra = \frac{1}{L}\int |Y(X)|dX \ ,$$

где *Y* – отклонение профиля, т.е. расстояние между любой точкой профиля и средней линией, измеренное по нормали, проведенной к средней линии через эту точку профиля. По ГОСТ нормируемые значения параметра *Ra* находятся в пределах от 0,008 до 100 мкм. Предпочтительными являются: 0,012; 0,025; 0,050; 0,10; 0,20; 0,40; 0,80; 1,60; 3,2; 6,3; 12,5; 25; 50; 100, т.е. параметрический ряд значений чисел, начиная с 0,012, основанный на геометрической прогрессии со знаменателем 2.

Высота неровностей профиля по десяти точкам Rz – среднее значение абсолютных высот пяти наибольших выступов и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины:

$$Rz = \frac{1}{5}\left(\sum_{i=1}^{5}\left|Y_{pi}\right| + \sum_{i=1}^{5}\left|Y_{vi}\right|\right),$$

где Y_{vi} – высота i-го наибольшего выступа; Y_{vi} – глубина i-й наибольшей впадины профиля.

По ГОСТ *Rz* и *Rmax* меняются в пределах от 0,025 до 1600 мкм. Параметрический ряд значений предпочтительных чисел начинается с 0,025 мкм и основан на геометрической прогрессии со знаменателем 2 (до 400 мкм).

Средний шаг неровностей Sm – среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины, определяется по формуле

$$Sm = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Sm_i ,$$

где Sm_i – шаг неровностей профиля, т.е. длина отрезка средней линии, пересекающего профиль в трех соседних точках и ограниченного двумя крайними точками; n – число шагов в пределах базовой длины.

Средний шаг по вершинам (средний шаг местных выступов) S – среднее арифметическое значение шага неровностей профиля по вершинам в пределах базовой длины вычисляется по формуле

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

где S_i – шаг местных выступов профиля, т.е. длина отрезка средней линии между проекциями на нее двух соседних местных выступов профиля.

Средний шаг неровностей и средний шаг местных выступов профиля в соответствии с ГОСТ выбираются из ряда от 0,002 до 12,5 мм.

Относительная опорная длина профиля на заданном уровне tp определяется как

$$tp = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{n} b_i \cdot 100\% = \frac{\eta_p}{L} \cdot 100\% ,$$

где η_p – сумма длин отрезков в пределах базовой длины, отсекаемых на заданном уровне в материале выступов профиля линией, эквидистантной средней линии.

Отношение опорной длины профиля к базовой длине определяется как

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

где P – уровень сечения профиля, под которым понимается расстояние между линией выступов профиля и линией, пересекающей профиль, эквидистантной средней линии профиля, т.е. его значение отсчитывается от линии выступов в процентах к наибольшей высоте неровностей профиля *Rmax*, причем, в соответствии с ГОСТ, числовые значения уровня P выбираются из ряда:

5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90% от *Rmax*.

Относительная опорная длина *tp* профиля выбирается из ряда:

10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%.

Опорная кривая профиля – это графическое изображение зависимости опорной длины профиля от уровня сечения профиля.

Опорная кривая профиля характеризует распределение материала в шероховатом слое и играет важную роль при расчетах фактических площадей касания шероховатых тел. Эту кривую целесообразно строить в относительных координатах *tp* и *x*, где $x = \frac{p}{R\max}$.

В этом случае для любых поверхностей кривые проходят через точки с координатами (0; 0) и (1; 1), что создает наглядность при сравнении их профилей (рис. 4.3).

Если ординаты профиля подчиняются нормальному закону распределения, то, как показано Н.Б. Демкиным,

$$tp = \frac{1}{2}\left[1 - \Phi\left(\frac{1-2x}{\sigma}\right)\right],$$

где σ – стандартное отклонение профиля.

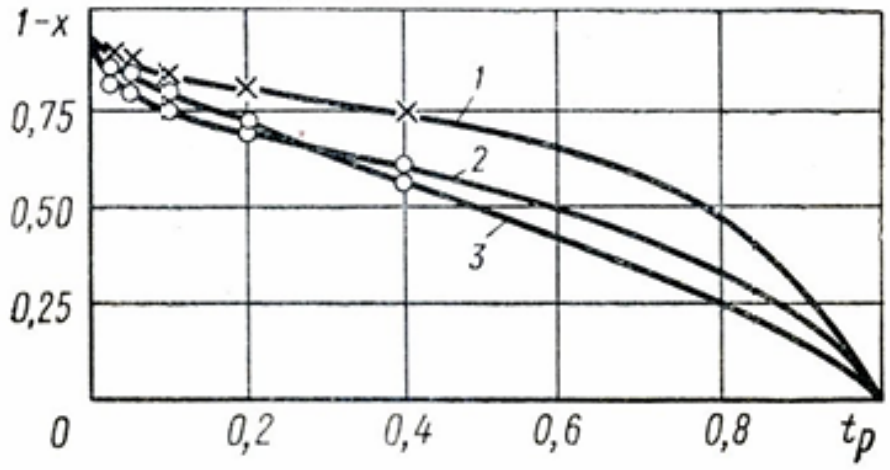


Рис. 4.3. Опорные кривые профилей поверхностей, полученных: 1 – полированием; 2 – шлифованием; 3 – точением

Функция *tp* в области значений $0 < x < 0,5$ может быть достаточно хорошо аппроксимирована степенной зависимостью:

$$tp = bx^{v} .$$

Эта аппроксимация иллюстрируется рис. 4.4.



Рис. 4.4. Профилограмма поверхности и аппроксимация опорной кривой

Параметры *b* и *v* в этой формуле зависят от интервала аппроксимации.

Соотношение $tp = bx^{v}$ получило широкое распространение при расчете контактных характеристик шероховатых поверхностей и в других смежных задачах как в России, так и за рубежом. Значения *b* и *v* получаются путем соответствующей обработки профилограмм поверхностей.

Таблица 4.1

Параметры шероховатости поверхности для различных видов обработки (стальные поверхности)

Вид обработки	*Ra*	*Rmax*	*b*	*v*
	мкм			
	от – до	от – до		
Цилиндрическое фрезерование	2,5 – 1,25 1,25 – 0,63	16 – 8 8 – 4	1,6 1,65	2,35 2,25
Торцовое фрезерование	2,5 – 1,25 1,25 – 0,63	16 – 8 8 – 4	0,55 0,60	1,65 1,40
Строгание	2,5 – 1,25 1,25 – 0,63	16 – 8 8 – 4	2,00 2,10	2,00 1,95
Точение	2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,32	16 – 8 8 – 4 4 – 2	1,40 1,80 2,00	1,95 1,80 1,60
Растачивание	2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,32	16 – 8 8 – 4 4 – 2	0,70 1,40 1,90	1,40 1,30 1,20
Плоское шлифование	2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,32 0,32 – 0,16	16 – 8 8 – 4 4 – 2 2 – 1	0,90 0,95 1,80 2,3	1,95 1,85 1,80 1,65
Внутреннее шлифование	2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,32 0,32 – 0,16	16 – 8 8 – 4 4 – 2 2 – 1	0,65 0,90 1,1 1,35	2,0 1,9 1,85 1,75
Круглое шлифование	1,25 – 0,63 0,63 – 0,32 0,32 – 0,16 0,16 – 0,08	8 – 4 4 – 2 2 – 1 1 – 0,5	0,6 0,9 1,27 2,00	2,00 1,95 1,90 1,90
Развертывание	2,5 – 1,25 1,25 – 0,63 0,63 – 0,32 0,32 – 0,16	16 – 8 8 – 4 4 – 2 2 - 1	1,1 1,15 1,45 1,55	1,85 1,70 1,60 1,55
Протягивание	1,25 – 0,63 0,63 – 0,32 0,32 – 0,16	8 – 4 4 – 2 2 – 1	0,6 0,8 1,0	1,75 1,72 1,70
Полирование	0,63 – 0,32 0,32 – 0,16 0,16 – 0,08	4 – 2 2 – 1 1 – 0,5	2,0 2,5 3,5	1,7 1,6 1,5

Каждый из этих показателей по-своему связан с условиями работы деталей. Так, показатели:

✓ *Rmax, Ra, Rz, tp* имеют наибольшее значение и должны регламентироваться для трущихся поверхностей ответственных дета-

лей; *tp* наиболее важна также для обеспечения контактной жесткости деталей;

✓ *Rmax, Sm, S* определяют условия работы деталей при циклических знакопеременных нагрузках.

Шероховатость поверхности оказывает влияние на качество посадок. При неподвижных посадках шероховатость поверхности влияет на их прочность. Например, прочность прессового соединения вагонных осей со ступицами колес при средней высоте неровностей поверхности *Ra* = 36 мкм на 40% ниже прочности соединения тех же деталей при средней высоте неровностей поверхности 18 мкм, несмотря на то, что натяг до запрессовывания в первом случае был на 15% больше, чем во втором.

Параметры шероховатости поверхности для различных видов обработки (стальные поверхности) приведены в табл. 4.1.

4.2.1. Типы направлений шероховатости

ГОСТ устанавливает семь типов направлений шероховатости (рис. 4.5).

4.2.2. Обозначение шероховатости на чертежах

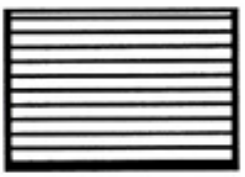
Правила обозначения шероховатости на чертежах определены ГОСТ 2.309-2011.

В соответствии с этим стандартом вводятся следующие правила обозначения шероховатости.

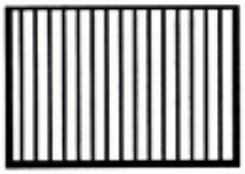
1. Шероховатость обозначается знаком $\sqrt{}$ в случае, если вид обработки поверхности конструктором не указан.

2. Если поверхность подлежит обработке со снятием слоя материала (точение, шлифование, полирование, травление и т.д.), применяется знак $\sqrt{}$.

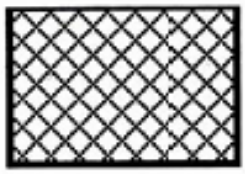
3. В обозначении шероховатости поверхности, образованной без удаления слоя материала (литье, ковка, прокат, штамповка и т.д.), применяется знак $\sqrt{}$.



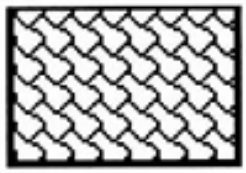
Параллельное (=) — параллельно линии, изображающей на чертеже поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования



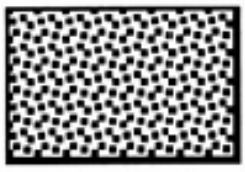
Перпендикулярное (⊥)



Перекрещивающееся (×)



Произвольное (*M*) — разные направления по отношению к линии, изображающей на чертеже поверхность, к шероховатости которой устанавливаются требования



Точечное (*P*)



Кругообразное (*C*)



Радиальное (*R*)

Рис. 4.5. Направления неровностей шероховатости

4. При применении знака без указания параметра и способа обработки его изображают без полки – $\sqrt{}$; $\sqrt{}$; $\sqrt{}$.

5. Значение параметра шероховатости указывается в обозначении шероховатости после соответствующего символа для осталь-

ных параметров – после обозначения символа, например: *Ra* 0,4; *Rz*50; *R*max6,3; S_m0,63;*S* 0,032; t_{50}70 (относительная опорная длина профиля t_p = 70% при уровне сечения *P* = 50%).

6. Если указывается диапазон значений параметров, их пределы указываются в две строчки, причем в верхней строчке приводится значение параметра, относящееся к более грубой шероховатости. *Например:*

$$Ra^{0,8}_{0,4};\ Rz^{0,08}_{0,04};\ t^{50}_{5070}.$$

7. При указании номинального значения параметра шероховатости, оно приводится с предельными отклонениями: *Ra*1±20%; *Rz*80$_{-10}$; S_m0,63^{+2}; t_{50}70±10%

8. При указании двух и более параметров шероховатости они записываются сверху вниз в следующем порядке:

✓ параметры высоты неровностей профиля *Ra* или *Rz*; Rmax (мкм);

✓ параметры шага неровностей профиля S_m и *S* (мм);

✓ относительная опорная длина профиля *tp* (%).

Например:

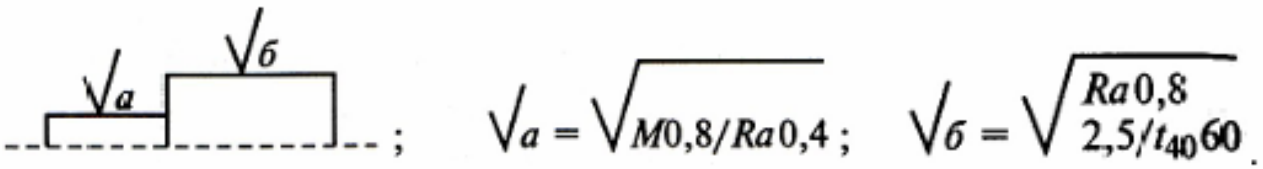
$$\sqrt{\begin{matrix} Ra0,1 \\ 0,8/S^{0,063}_{m0,040} \\ 0,25/t_{50}80\pm10\% \end{matrix}}.$$

В ГОСТ 2789-73 не предусматривается обязательная привязка базовых длин к определенным числовым значениям параметров шероховатости, но приведены соотношения между значениями параметров *Ra; Rz; Rmax* и базовой длины, при соблюдении которых базовая длина не указывается.

9. Вид обработки поверхности указывают в обозначении шероховатости только в случаях, когда он является единственным, применимым для получения требуемого качества поверхности:

$$\sqrt{\begin{matrix} \textbf{\textit{Полировать}} \\ \textbf{\textit{M Ra}}0,025 \end{matrix}}.$$

10. Допускается следующее упрощенное обозначение шероховатости:



Таким образом, общее обозначение (рис. 4.6):

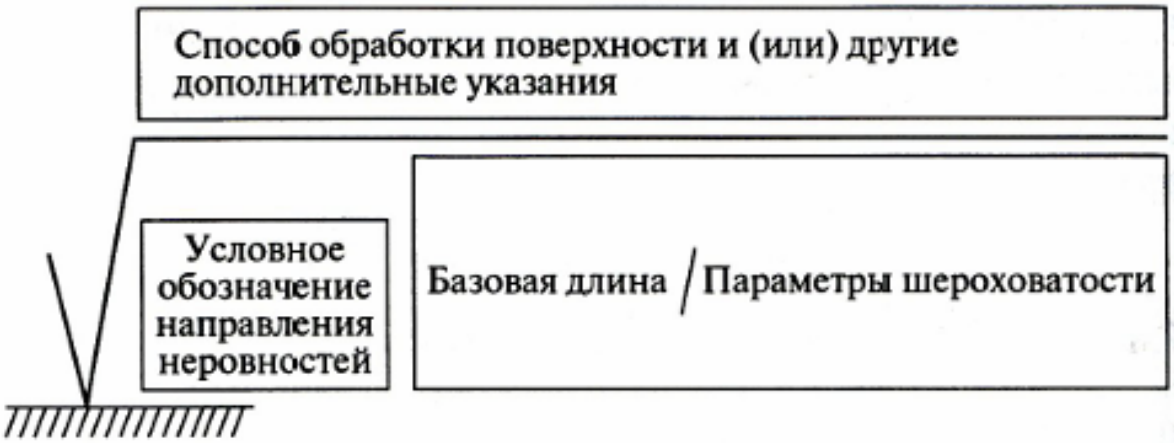


Рис. 4.6. Структура обозначения шероховатости поверхности

В правом верхнем углу чертежа (рис. 4.7) ставится знак шероховатости, общий для поверхностей, на которые не проставлены требования к шероховатости (в данном случае читается как «все остальные поверхности – без обработки»).

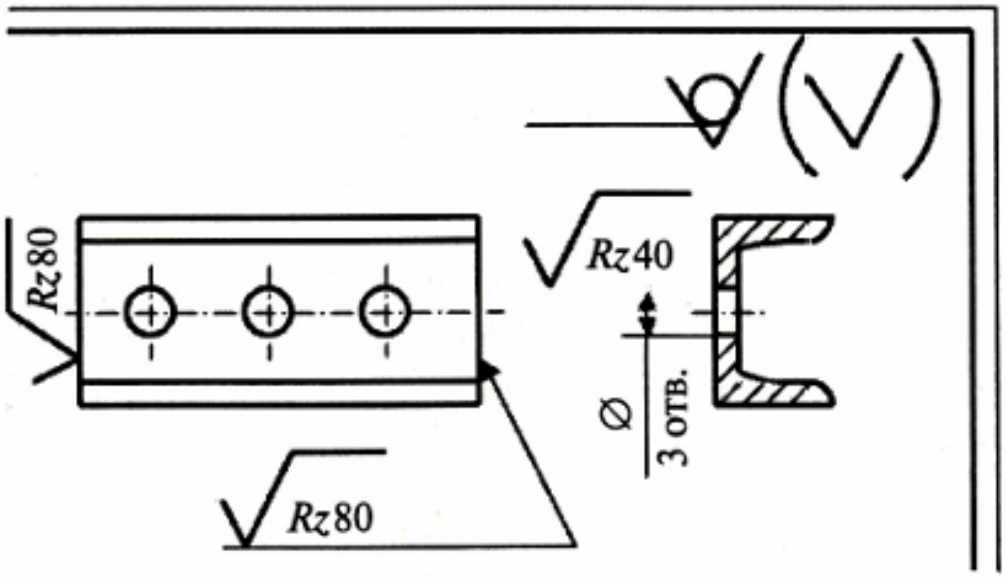


Рис. 4.7. Обозначения шероховатости поверхности на чертеже

4.3. Волнистость поверхностей

Вследствие волнистости поверхности лишь ограниченная часть рельефа участвует в формировании фактической площади контакта. Неровности, которые лежат во впадинах волн, не участвуют в формировании площади контакта и образуют нерабочую часть профиля. Для того чтобы выделить из всего профиля поверхности его рабочую часть, в задачах трения и износа вводится понятие о волнистости, характеризуемой высотой волны $H_в$ и радиусом $K_в$.

Волнистость – это совокупность периодически чередующихся возвышенностей и впадин, образующих неровности поверхности, у которых расстояния между смежными возвышенностями или впадинами превышают базовую длину (рис. 4.8).

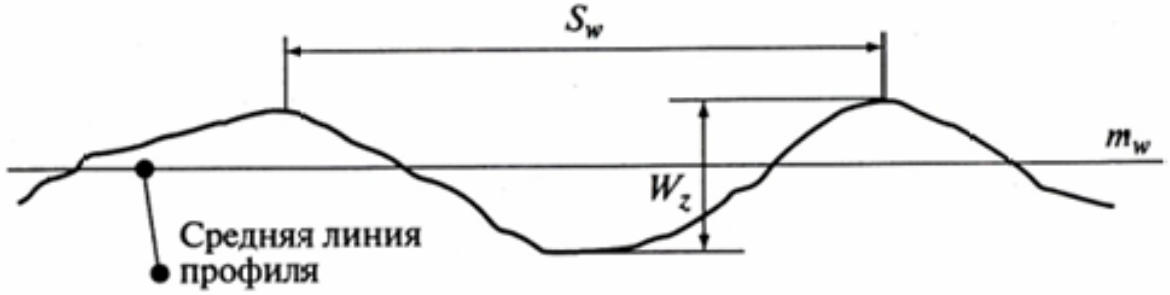


Рис. 4.8. Профилограмма волнистости поверхности

Волнистость занимает промежуточное положение между отклонениями формы и шероховатостью поверхности. Граница между различными порядками отклонений поверхности устанавливается по значению отношения шага S_w к высоте W_x.

При $\frac{S_w}{W_z} < 50$ – шероховатость;

$50 < \frac{S_w}{W_z} < 1000$ – волнистость;

$1000 < \frac{S_w}{W_z}$ – отклонение формы.

Высота волнистости определяется как среднее арифметическое

$$W_z = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} W_{zi} .$$

Отдельные измерения волнистости производятся на длине L_{wi}, равной пятой части длины L_w.

Числовые значения параметра W_z выбираются из ряда: 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,3; 12,5; 25; 50; 100; 200 (мкм).

Средний шаг волнистости S_w – среднее арифметическое значение расстояния S_{wi}. между одноименными сторонами соседних волн, измеренных по средней линии профиля, определяется по формуле

$$S_w = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} S_{wi}, \text{ мкм.}$$

Форма волны может быть различной, но чаще всего – синусоидальной, что является следствием вибрации системы СПИД, возникающей из-за неравномерности сил резания, погрешностей привода и т.д.

Измерение волнистости ведется волномерами.