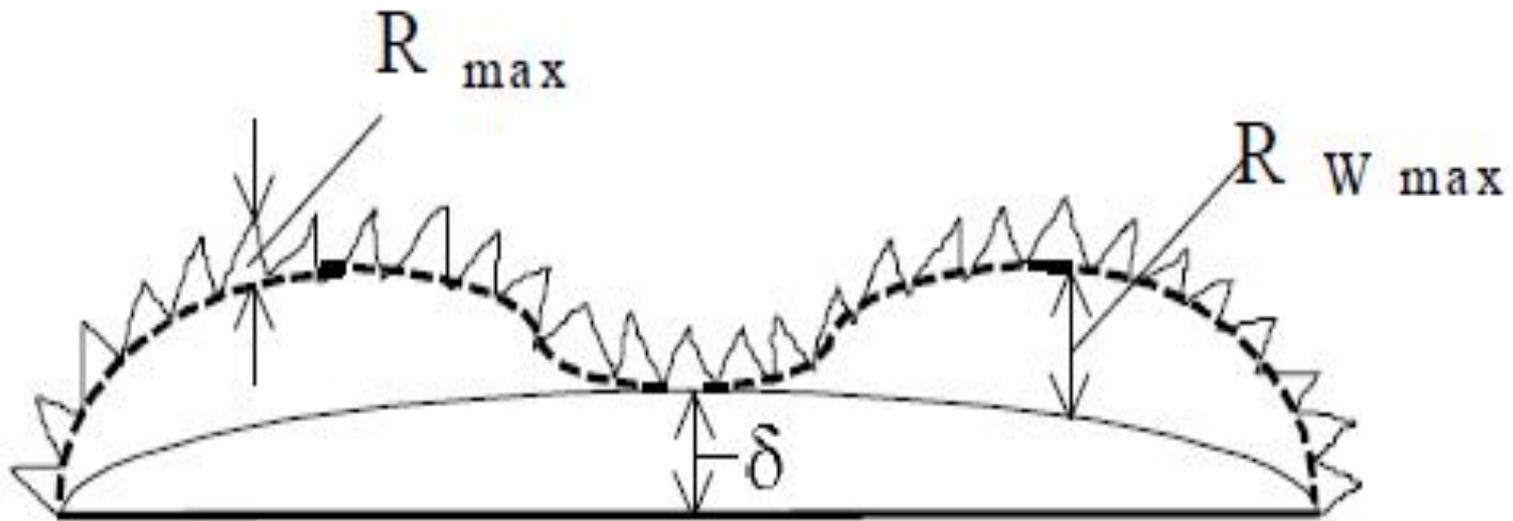


ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О КОНТАКТИРОВАНИИ И ТРЕНИИ СОПРИКАСАЮЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

1. Анализ контактирования и оценка площади соприкосновения



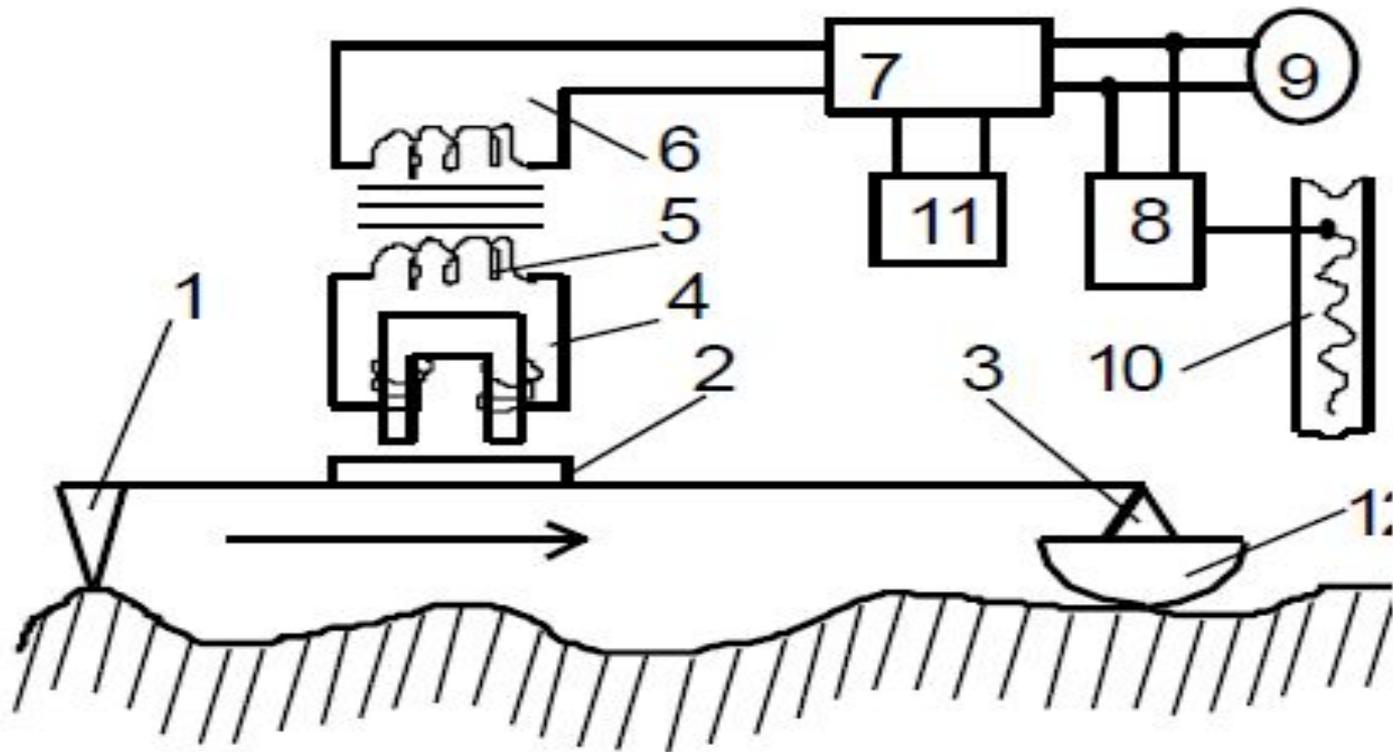
Основные характеристики геометрии шероховатых поверхностей:

R_{max} - шероховатость с максимальной высотой профиля;

$R_{w max}$ - волнистость с максимальной высотой волны;

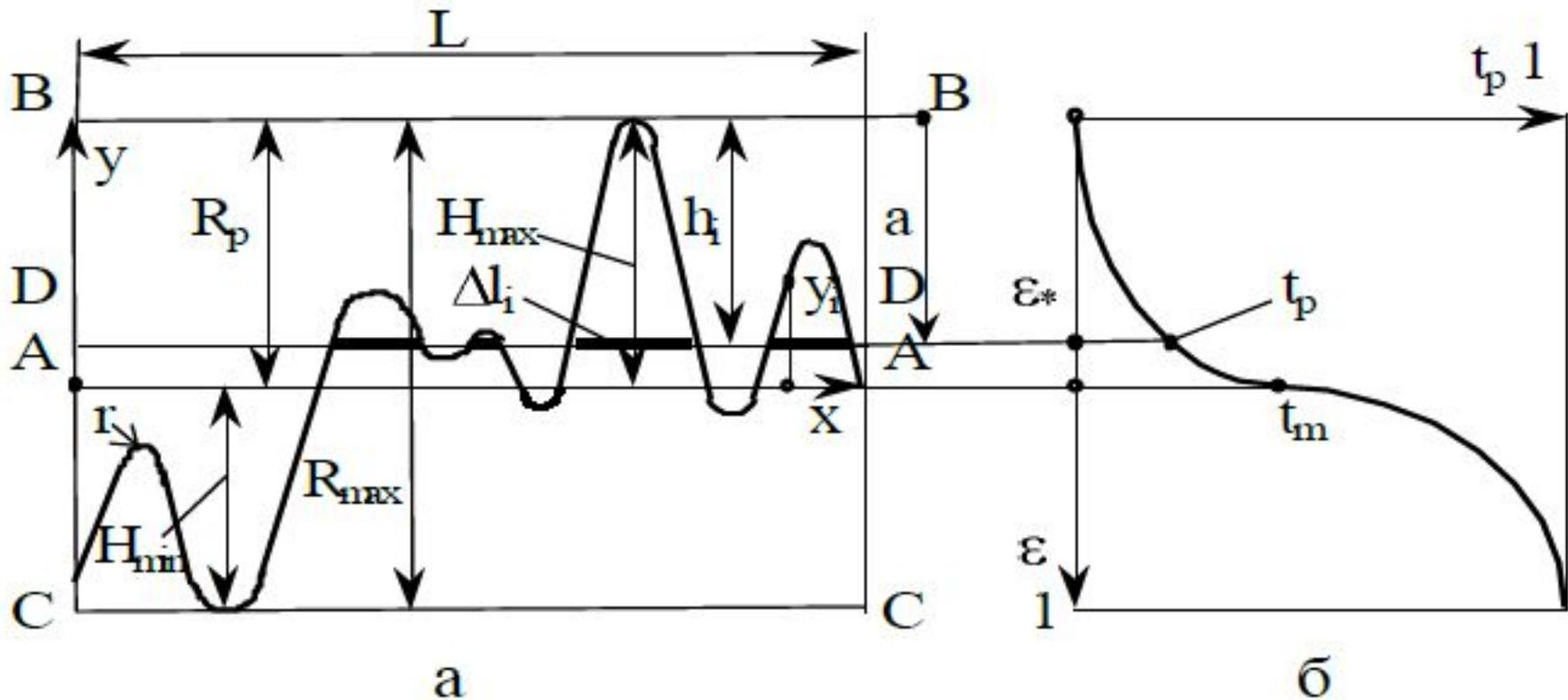
δ - макроотклонение от горизонтальной базовой плоскости.

Схема современного профилографа



Игла 1 скользит по шероховатой поверхности и вместе с якорем 2 поворачивается относительно призмы 3, в результате чего меняется зазор между якорем 2 и сердечником 4, что генерирует переменный сигнал в катушках 5 и 6, который усиливается блоком 7 и регистрируется на ленте 10 самописца 8, а также стрелочным прибором 9. Микропроцессор 11 предназначен для вычисления стандартных показателей микрогеометрии, которые высвечиваются на цифровом табло. Для исключения влияния волнистости призма прибора прикреплена к шаровой опоре 12. Шаровая опора обеспечивает скольжение по вершинам микровыступов, огибая волны, поскольку если опора будет скользить по плоской гладкой поверхности, то одновременно будут записываться шероховатость и волнистость.

2. Основные характеристики микрогеометрии (ГОСТ 278973)



а) - характеристики шероховатостей; б) - опорная кривая

R_a - среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля шероховатостей от средней линии в пределах базовой длины L :

$$R_a = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |y(x)| \cdot dx \quad \text{или} \quad R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

Положение средней линии AA находится из соображения о том, что она делит площадь профиля пополам ($\int y dx = 0$). Профиль заключен между линиями выступов ВВ и впадин СС, которые проводятся через вершины самых высоких выступов и самые низкие точки впадин.

R_z - характеризует среднее расстояние между пятью высшими вершинами выступов и пятью низшими точками впадин:

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_1^5 |H_{i\max}| + \sum_1^5 |H_{i\min}| \right)$$

R_{max} - расстояние между линиями выступов и впадин, равное толщине шероховатого слоя. Удаление линии выступов от средней линии обозначается R_p. Кроме перечисленных характеристик используются также средний шаг микронеровностей, средний угол наклона профиля, средний радиус закругления выступа.

По своей форме выступы напоминают пологие горные хребты. Угол при вершине для всех видов обработки обычно заключен в интервале от 150 до 176°.

Наиболее близким по форме к реальному выступу является эллипсоид.

3. Опорная кривая

Для статистического анализа и представления характеристик шероховатых поверхностей используют закон распределения материала по глубине шероховатого слоя на выбранной базовой длине L , который характеризует опорная кривая (рис. б).

Эту кривую получают как зависимость относительной суммы сечений микровыступов t_p от относительного сближения ε :

$$t_p = \frac{1}{L} \sum_1^m |\Delta L_i|$$

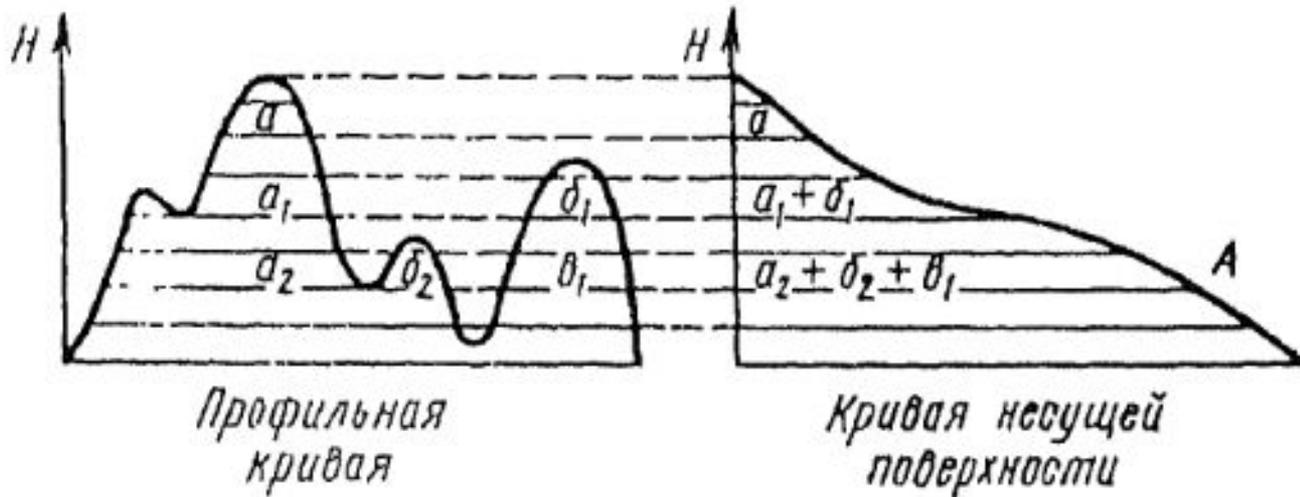
$$\varepsilon_* = \frac{a}{R_{\max}}$$

Для аналитического описания опорной кривой используют степенную функцию. Так, начальный участок опорной кривой (см. рис.б) принято описывать выражением

$$t_p = t_m \varepsilon^v. \quad (1)$$

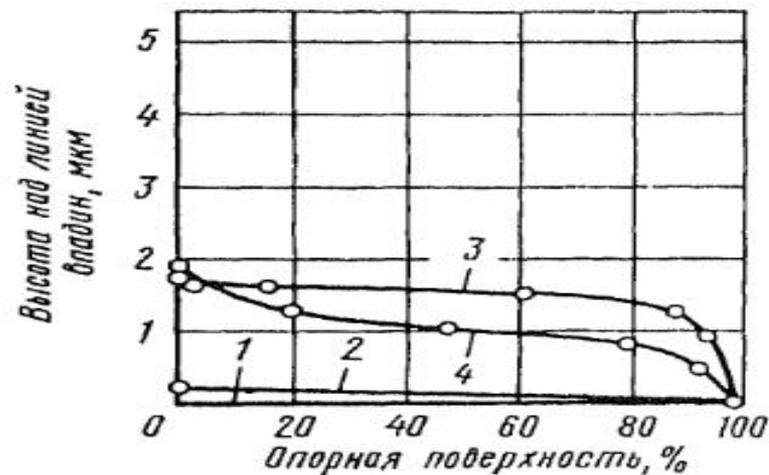
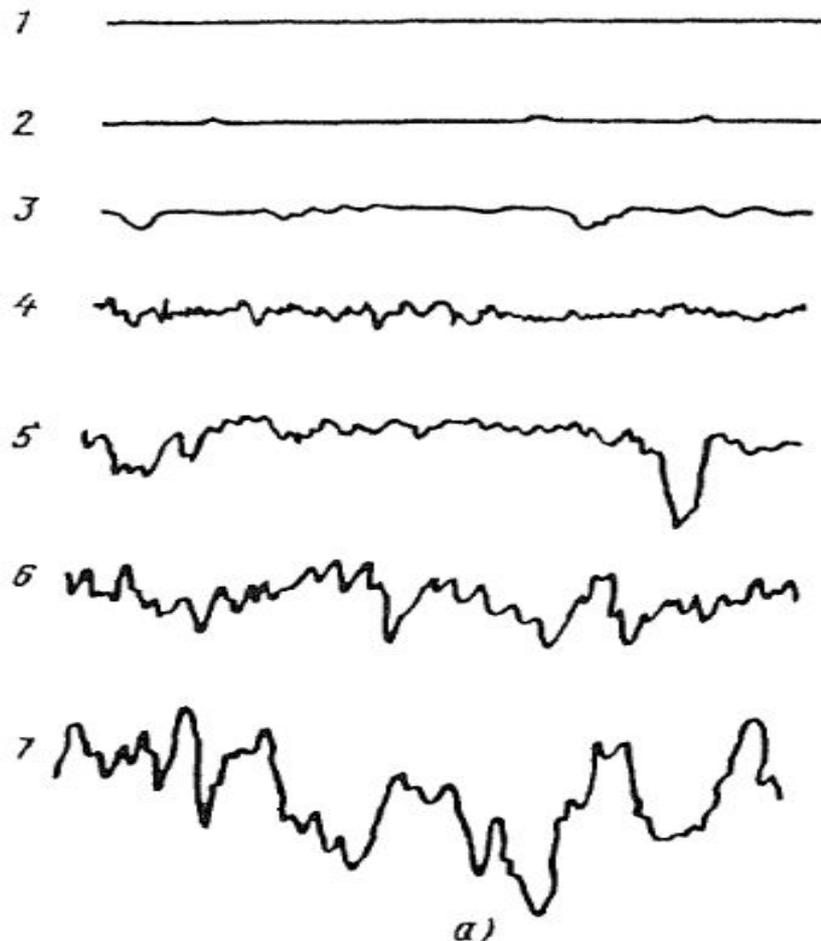
$\varepsilon = a/R_p$, $t_m = t_p$ при $a = R_p$, $v > 1$ - параметры опорной кривой.

Построение опорной кривой



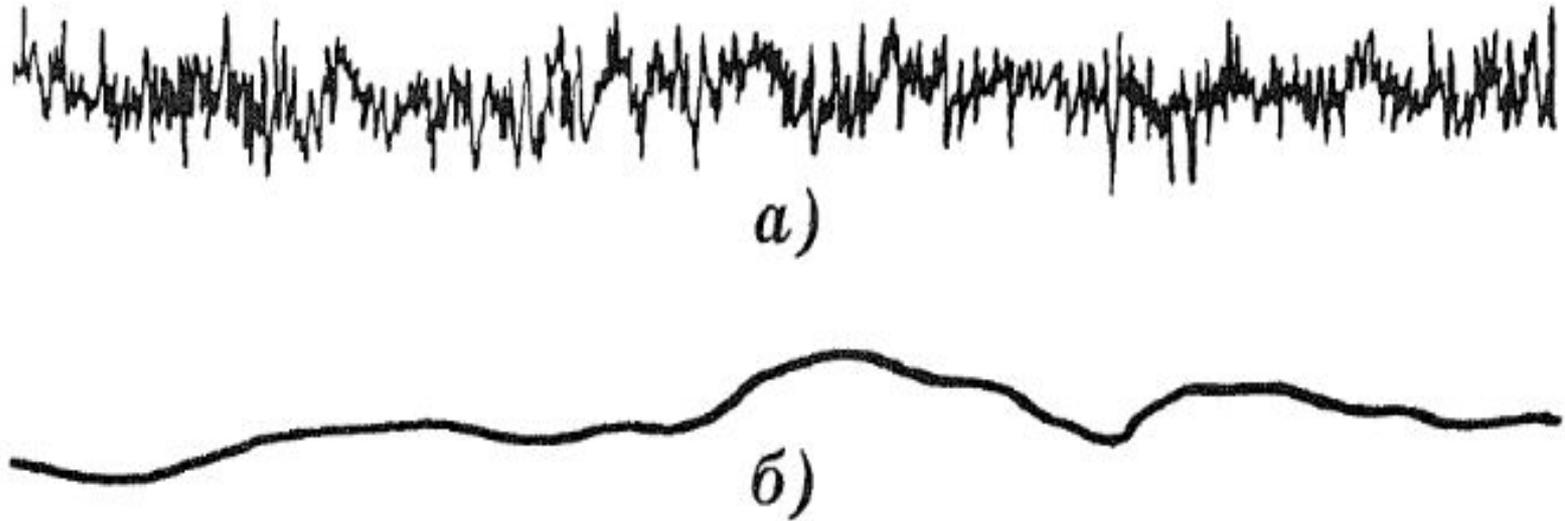
Для построения кривой несущей поверхности (опорной кривой) рассечем профильную кривую параллельными прямыми. Общую длину лежащих внутри профильной кривой отрезков на той или иной высоте отложим в виде отрезков совокупной суммы. В результате получим искомую кривую, отображающую в какой-то мере увеличение несущей площади детали по мере срабатывания ее наружных слоев.

Профильные и опорные кривые для различных поверхностей



1 – идеальной; 2 – мерительной плитки; 3 – после лапингования; 4 – после шлифования;
5 – после фрезерования; 6 – после тонкого растачивания; 7 – после сверления.

Профилограмма стальной поверхности после шлифования



а) – вертикальное увеличение 40000, горизонтальное увеличение 400;

б) – действительный профиль поверхности при одинаковом увеличении.

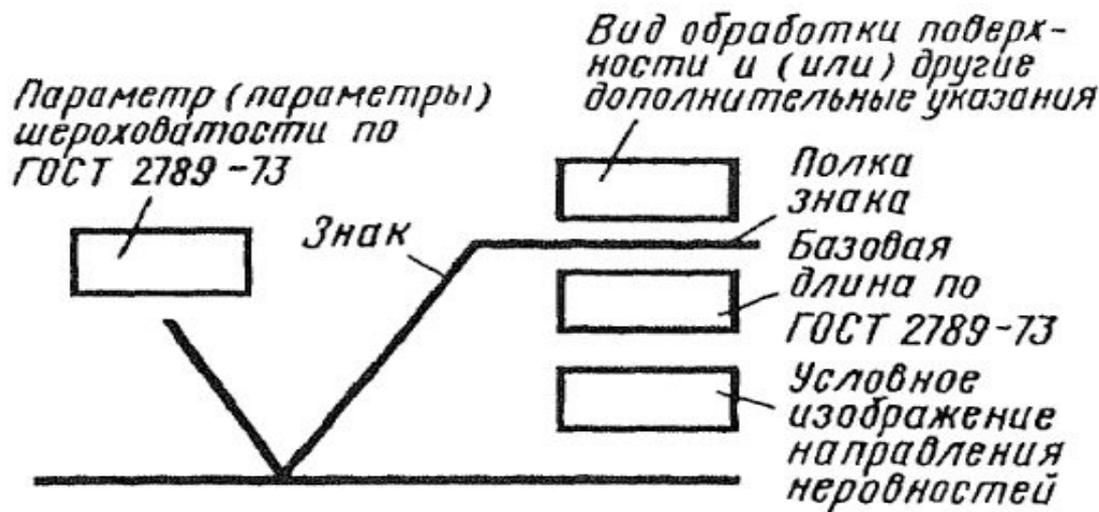
Профилограммы обработанной поверхности имеют вид острой пилы из-за того, что вертикальное увеличение во много раз больше, и в действительности профиль выглядит иначе. Отдельные неровности имеют пологую форму. Самые гладкие металлические поверхности имеют неровности высотой порядка 100 межатомных расстояний.

4. Характеристики шероховатости

ГОСТом 2789-73 предусмотрено 14 классов шероховатости .

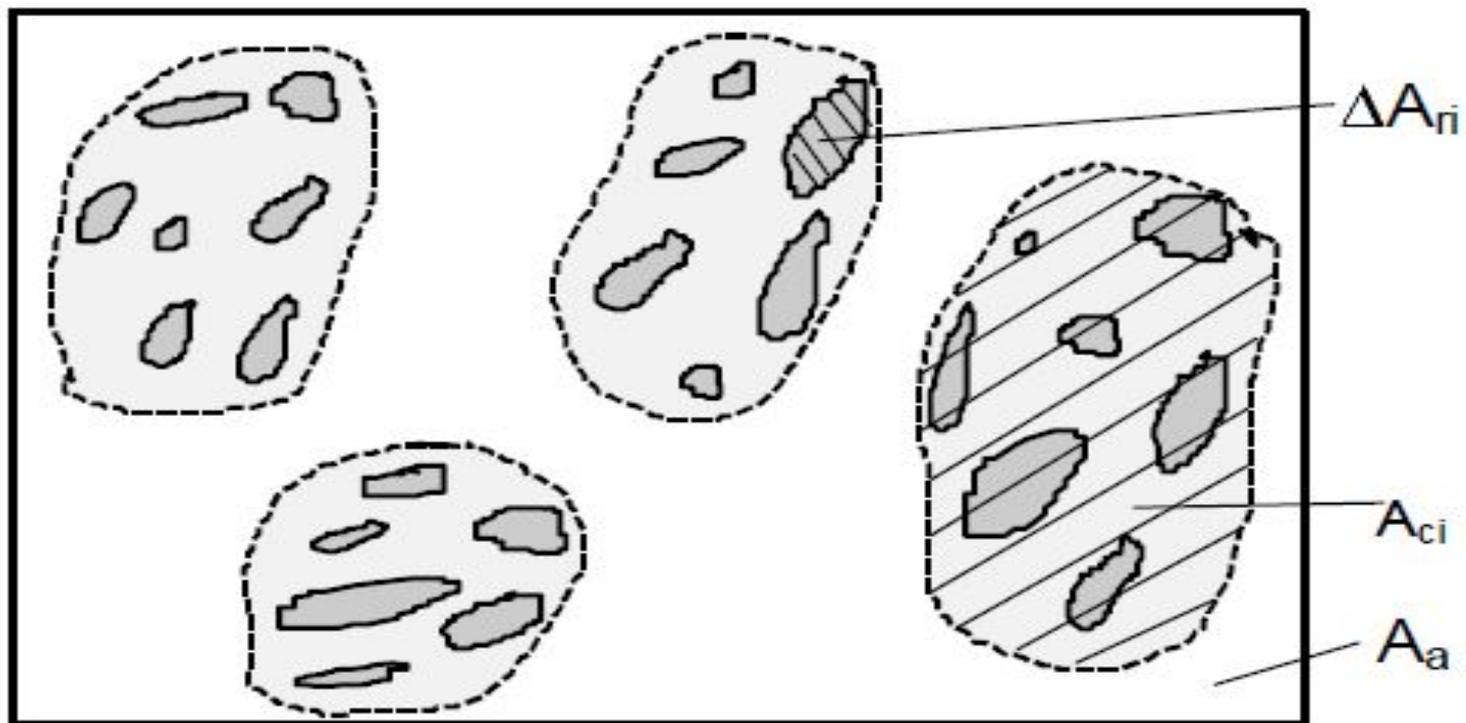
Для примера приведены данные шероховатости наиболее ответственных деталей ДВС автомобилей.

Наименование детали	Класс	R_a , мкм	r , мкм	R_{max} , мкм
Гильза цилиндра	9	0,04	100	1,2
Коленвал (шейки)	9	0,05	500	1,6
Поршневое кольцо	10÷11	0,02	270	0,48



- обозначение шероховатости по ГОСТ 2.309 - 73

5. Оценка фактической площади контакта шероховатых поверхностей



A_a - номинальная площадь контакта;

A_{ci} - контурная площадь;

ΔA_{ri} - фактическая площадь единичного пятна контакта.

6. Контакт шероховатой поверхности с гладкой

При рассмотрении упрощает задачу, а результаты можно перенести на контакт двух шероховатых поверхностей. Поскольку в узлах трения деформация выступов невелика по сравнению с их размером, то можно пренебречь искажением формы и считать, что площадка контакта A_{ri} равна площади сечения выступа на расстоянии от вершины равном деформации a_i , которую называют сближением.

При упругой деформации фактическая площадь касания (ФПК) и сближение рассчитываются по формулам Герца:

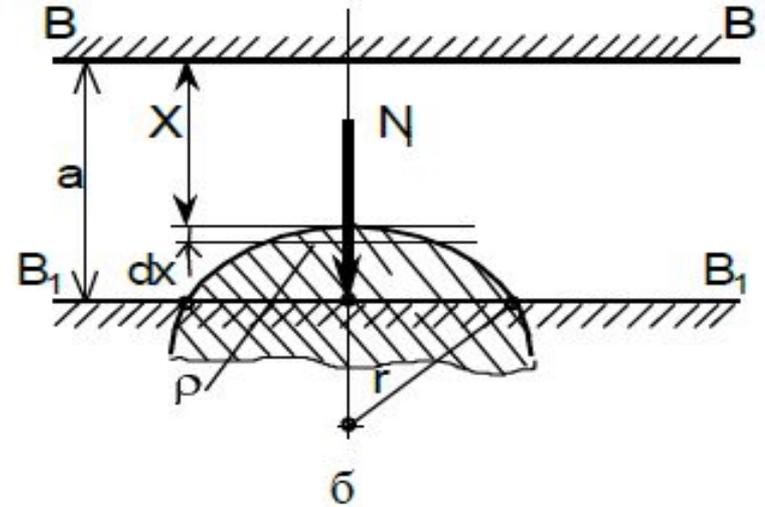
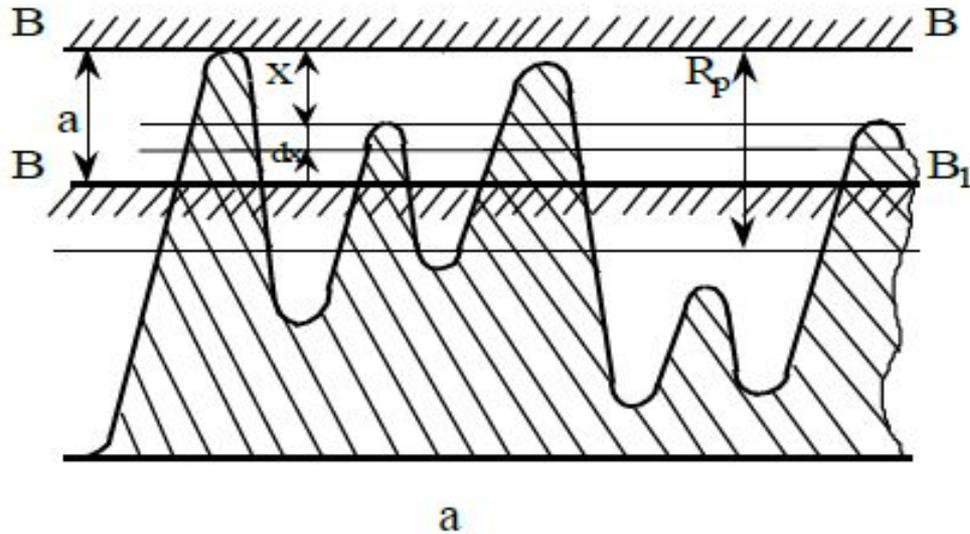
$$(2) \quad \Delta A_{ri} = 0,82 \pi j N_i r^{2/3};$$

$$(3) \quad a_i = 0,82 j N_i / \sqrt{r^{2/3}};$$

$$j = \frac{1 - \theta_1^2}{E_1} + \frac{1 - \theta_2^2}{E_2}$$

где j – постоянная упругости, N – нормальная нагрузка, r – радиус выступа, θ_1 и θ_2 – коэффициенты Пуассона, E_1 и E_2 – модули Юнга для первой и второй поверхностей.

Рассмотрим деформацию одного выступа



При пластической деформации возможно либо внедрение, либо расплющивание выступа. Среднее давление на контакте считается равным твердости более мягкого материала. Тогда:

$$(4) \quad \Delta A_i = N_i / HB,$$

$$a_i = N_i / 2\pi r HB .$$

Здесь HB - твердость по Бринелю, которая определяется как частное от деления нагрузки на площадь отпечатка, оставшегося после внедрения твердого шарика в пластичный материал.

Образное представление площади ФПК иллюстрируют с помощью следующего приема. Если мысленно срезать шероховатости на уровне, соответствующем части высоты выступов, то сумму образовавшихся площадок в сечениях выступов можно считать равной ФПК. ФПК вычисляют, пользуясь уравнением опорной кривой (1), что справедливо, когда площадь сечения выступа равна площади контакта, при условии, что сближение равно расстоянию от вершины до секущей плоскости. Так, примерно, и происходит при пластической деформации. Из формул (2), (3) следует, что при упругой деформации площадь сечения по средней линии ΔA_{si} связана с площадью контакта A_{ri} следующим образом:

$$\Delta A_{ri} = \alpha \cdot \Delta A_{si} ,$$

где коэффициент осадки $0,5 \leq \alpha \leq 1$. С учетом этого ФПК можно выразить через опорную кривую следующим образом:

$$(5) \quad A_r = \alpha A_s = \alpha A_c t_p = \alpha \cdot A_c \cdot t_m \varepsilon^V = \alpha A_{so} \left(\frac{a}{R_p} \right)^V .$$

Прежде, чем приступить к расчету ФПК, проанализируем геометрию выступов шероховатости поверхностей (рис. 12 сл.) Число выступов по мере удаления от верхней границы шероховатого слоя меняется по закону:

$$n = n_0 \left(\frac{a}{R_p} \right)^{\nu-1},$$

где n_0 - число выступов, вершины которых лежат выше средней линии.

Площадь сечения всех выступов, рассеченных плоскостью, удаленной от верхней границы на величину a :

$$A_s = \int_0^a dA_s = \frac{2 \pi n_0 R_p}{\nu} \left(\frac{a}{R_p} \right)^{\nu} = A_{so} \left(\frac{a}{R_p} \right)^{\nu}.$$

Это соответствует формуле (4) при $\alpha = 1$. Следовательно, площадь сечения шероховатого слоя плоскостью, проходящей через среднюю линию,

$$A_{so} = \frac{2 \pi R_p}{\nu} n_0 = \frac{2 \pi R_p n_{oc}}{\nu} A_c.$$

•
Здесь $2\pi rR_p = \Delta A_{s\max}$ - площадь сечения самого высокого выступа, n_{oc} - число выступов, вершины которых расположены выше среднего уровня в расчете на единицу контурной площади.

Идея расчета ФПК при упругом контактировании заключается в следующем. Шероховатый слой сжимается плоским гладким штампом от исходного положения ВВ до конечного B_1B (рис.12 а). Каждый выступ деформируется на величину $a - x$. По формуле 3:

$$a - x = 0,82 j N_i / \sqrt{r^{2/3}}.$$

Нагрузка на выступ, вершина которого лежит в слое dx :

$$N_i = \sqrt{r} (a - x)^{3/2} / 0,82^{3/2} j.$$

Тогда выражения для расчета ФПК и величины сближения будут иметь вид:

$$(6) \quad A_r = \pi \left[\frac{0,74}{K_1} \left(\frac{r^{v+1} n_{oc} A_c}{v R_p^{v-1}} \right)^{\frac{1}{2v}} j^{\frac{2v}{2v+1}} \right]^{\frac{2v}{2v+1}} N^{\frac{2v}{2v+1}} = B N^{\frac{2v}{2v+1}}.$$

$$(7) \quad a = \left(\frac{0,74 R_p^{v-1} v \cdot j}{n_{oc} A_c \cdot r^{1/2} k_1} \right)^{\frac{2}{2v+1}} N^{\frac{2}{2v+1}}.$$

Формулы (5), (6) отражают влияние характеристик микрогеометрии, физико-механических свойств и нагрузки на показатели контактной деформации. Так, при изменении v от 2 до 3, что характерно для встречающихся на практике поверхностей, показатель степени нагрузки у Ar меняется от $4/5$ до $6/7$. При увеличении v зависимость ФПК от нагрузки стремится к линейной. При пластическом контакте среднее давление на пятна касания близко к твердости по Бринелю, поэтому ФПК выражается в виде $Ar = N/HB$.

Отметим, что для приработанных поверхностей узлов трения характерен упругий контакт. Пластический контакт может частично проявиться при первых нагружениях, когда сжимаются наиболее высокие выступы. Последующие нагружения происходят уже в условиях, приближенных к упругому контакту. Пластический контакт имеет место также при обработке материалов резанием, ковкой, штамповкой, прессованием, накаткой и др.

Список литературы

- Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Камбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
- Крагельский И.В. Узлы трения машин: справочник / И.В.Крагельский, Н.М.Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
- Дроздов Ю.Н. и др. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. – Машиностроение, 1986 – 224с.
- Справочник по триботехнике: в 3т. / под общ. ред. М.Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
- Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безысность): Учебник/ Д.Н. Гаркунов. – М.: Изд-во «МСХА», 2001. – 616 с.
- Современная трибология: итоги и перспективы / под. ред. К.В. Фролова. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008 г. – 480 с.
- Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка — М : Машиностроение, 2003. — 576 с.