Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине
«Основы технологии машиностроения»
для студентов направлений

15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»
15.03.02 «Технологические машины и оборудование»

Энгельс 2026

Цель работы: Изучение шероховатости обработанной поверхности методом математической статистики, приобретение практических навыков анализа шероховатости с применением ЭВМ.

1. Теоретическая часть

Качество обработанной поверхности является одним из главных областей направлений в современной технологии машиностроения. Технологические методы формирования поверхностного слоя с заданными физико-механическими характеристиками являются наиболее эффективными в обеспечении заданного ресурса работы машин, т.к. потеря детали своего служебного назначения и ее разрушение в подавляющем большинстве случаев начинается с поверхностного слоя. Как известно, качество обработанной поверхности характеризуется следующими признаками:

1) шероховатостью поверхности;
2) физико-механическими свойствами поверхностного слоя металла;
3) технологическими остаточными напряжениями.

Шероховатость поверхности – совокупность неровностей с относительно малыми шагами (S_m/R_z < 50), образующих рельеф поверхности. Шероховатость поверхности после механической обработки – это геометрический след режущего инструмента (лезвийного или абразивного), искаженный в результате пластического и упругого деформирования элементов технологической системы (ТС).

Для нормирования и оценки шероховатости применяются следующие параметры (рис.1).

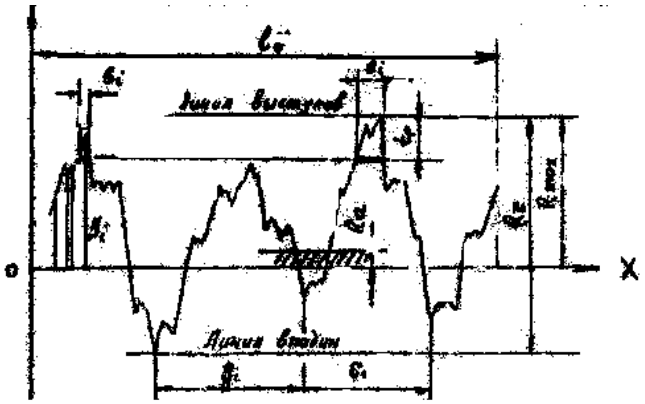

Рис. 1. Профиль шероховатости поверхности и его параметры

1) Высота неровностей профиля R_z (определяемая по 10 точкам):

$$R_z = \frac{1}{5}\left[\sum_{1=1}^{5}|y_{max}| + \sum_{1=1}^{5}|y_{min}|\right]$$

2) Среднее арифметическое отклонение профиля в абсолютных значениях в пределах базовой длины l:

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

или приближенно $$R_z = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i|$$

где y_i – отклонение профиля, определяющее расстояние между точкой реального профиля и средней линией профиля;

n – число выбранных точек на базовой длине.

3) Средний шаг неровностей профиля S_m – это среднее значение шага неровностей в пределах базовой длины:

$$S_m = \frac{1}{n_1}\sum_{i=1}^{n_1} S_{i_1}$$

где n_1 – число износа в пределах базовой длины;

Si – переменный шаг для двух смежных микровыступов (микровпадин).

4) Длина профиля L_{np} - это длина, которая получится, если все выступы и впадины профиля в пределах базовой длины вытянуть в одну линию.
5) Относительная длина профиля $L_{np}*$ это отношение длины профиля к базовой длине l_δ

$$L_{np}^* = \frac{L_{np}}{\ell_\delta}$$

6) Опорная линия профиля l_p – сумма длин отрезков, отсекаемых на заданном уровне t_p выступов профиля линий, эквидистантная средней линии в пределах базовой длины

$$l_p^* = \frac{l_p}{l_\delta}\cdot 100\%$$

Численные значения уровня сечения профиля p от R_{max} выбираются из ряда: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90. Перечисленные параметры – три высотных (R_z, R_a, R_{max}) и два шаговых (S_m, S_i) позволяют сделать количественную оценку и нормирование шероховатости.

Численные значения высотных и шаговых параметров приведены в ГОСТ 2789-73.

Основные приведенные параметры шероховатости не дают достаточной информации для анализа профиля поверхности и технологического управления шероховатостью при формировании поверхностного слоя, в частности, технолога интересует:

- регулярный или случайный характер носит распределение микровыступов или микровпадин в рельефе;
- какова доля регулярного и случайного процессов?
- спектральный анализ рельефа и наиболее интенсивные гармоники в процессе;

- площадь опорной поверхности на заданном уровне;

- объем областей, между поверхностью и плоскостью на заданном уровне и другие.

Приведенные выше параметры шероховатости, предусмотренные ГОСТом, ответа на эти вопросы не дают. Для полного исследования шероховатости в последнее время широкое распространение получил корреляционный анализ и, в частности, две важнейших функции:

а) корреляционная (автокорреляционная) функция профиля;

б) функция спектральной плотности.

Автокорреляционная функция профиля поверхности (коррелограмма) формируется на основе графического документа – профилограммы, полученной путем записи участка поверхности детали длиной L на профилометре (рис. 2).

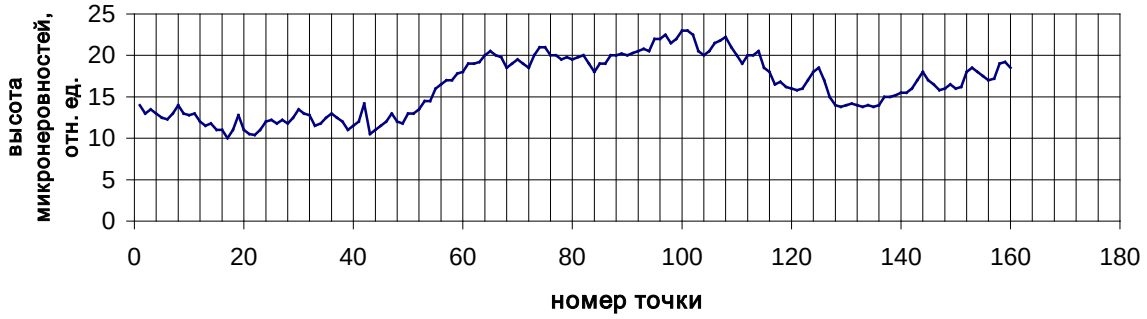

Рис. 2. Профилограмма поверхности детали (А), записанная на профилометре

Она указывает на вид связи (закон изменения) между высотой микровыступов (микровпадин) по мере их удаления друг от друга в направлении их измерения. В отличие от профилограммы автокорреляционная функция четко указывает на наличие (или отсутствие) детерминированные и случайных процессов, определяет долю их составляющих в профиле (рис. 2б).

Корреляционные функции определяются по точкам из следующего соотношения:

$$R(\tau) = \frac{1}{N\tau} \sum_{n=1}^{N-\tau} y_n y_{n+\tau}$$

где N – количество необходимых значений (точек) корреляционной функции; τ - номер шага.

Корреляционная функция может иметь различную форму (табл. 1). Функция, показанная на рис. 1, соответствует профилю поверхности, где микровыступы (микровпадины) имеют случайное расположение. Такой рельеф поверхности формируется обычно при шлифовании от действия большого числа случайно расположенных абразивных зерен. На рис. 2

приведена форма корреляционной функции, соответствующая профилю поверхности, получаемой при черновом обтачивании. Коррелограмма указывает на строгую закономерность (закон косинуса), получающуюся от перемещения токарного резца. В более общем случае форма корреляционной функции отражает наличие и в ней как случайной так и систематической составляющей. Такая коррелограмма показана на рис. 3 и рис. 4 (табл. 1 Приложения). В этом случае соответственно:

$$R(\tau_0) = R_\beta(\tau_0) + R_\gamma(\tau_0)$$

или $$R(\tau_0) = R_\beta(\tau_0) \cdot R_\gamma(\tau_0)$$

где $R_\beta(\tau_0)$ - систематическая составляющая функции в начальной точке;

$R_\gamma(\tau_0)$ - случайная составляющая.

Средний шаг периодической составляющей $\overline{T}_\beta$ рассчитывается по формуле:

$$\overline{T}_\beta = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} T_{\beta_i} .$$

T_{β_i} - величина шага между смежными микровыступами; m – общее число неровностей.

Средний шаг случайной составляющей T_γ определяется по следующей формуле:

$$T_\gamma = \frac{5\tau_p}{\sqrt{ln\left(\frac{k_\gamma(\tau_p)}{\sigma_\gamma^2}\right)}} .$$

где τ_p – абсцисса точки *p*, выбираемой на произвольной расстоянии от начала координат, но обязательно на участке кривой, расположенной выше систематической части коррелограммы.

2. Применение корреляционной функции для исследования волнистости поверхности

Анализ коррелограмм корреляционной функции обработанной поверхности показывает, что они тесно связаны с технологической системой. Приведем некоторые зависимости:

1) высота периодических волн коррелограммы, характеризуемая величиной σ_β, не зависит от точности станка, а высота случайно расположенных волн, характеризуемая σ_γ, пропорциональна среднеквадратичному значению точности размеров, получаемых при механической обработке:

$$\sigma_{cm} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(D_i - \overline{D}_{cp})^2 \frac{1}{n}} .$$

Это указывает на то, что источник периодических волн не связан с податливостью (жесткостью) узлов и степенью износа деталей станка, которые влияют на σ_{cm}.

Можно считать, что зазоры в соединениях, волнистость поверхности деталей станка и их изношенность, под действием которых формируется профиль обработанной поверхности, являются случайными величинами или функциями.

2) шаги между волнами T, T_γ, T_β, изменяются в зависимости от технологических факторов более интенсивно, чем высота волн. Чем более точный станок, тем больше расстояние между волнами;

3) увеличение скорости резания V_p оказывает малое влияние на высоту волн. С ростом V_p σ_β увеличивается незначительно, а σ_γ – уменьшается. Однако в целом рассеивание точек волнограммы по высоте остается постоянным. Значительно большее влияние оказывает скорость резания на шаге волн. С увеличением скорости σ уменьшается, а шаг существенно возрастает. Это указывает на то, что коэффициент γ, характеризующий долю (удельный вес) периодической составляющей в волнограмме, становится все ощутимей;

4) периодическая составляющая с параметрами σ_β и T_β не зависит от способа установки заготовки на станке, а случайная составляющая с характеристиками σ_γ и T_γ существенно зависит. Чем больше жесткость технологической системы, тем меньше σ_γ и больше T_γ.

5) С ухудшением обрабатываемости материала возрастает σ_β, σ_γ, σ и уменьшается T, T_γ, T_β.

Функция спектральной плотности (периодограмма) позволяет выполнить гармонический анализ и выявить наиболее интенсивные составляющие в профилограмме. Это зависимость дает возможность выявить фактора, действующие с определенной периодичностью в процессе формирования шероховатости поверхности и скорректировать (при необходимости) параметры процесса резания.

Это функция выражается через корреляционную функцию следующим образом:

$$G(f) = 2h\left[R_0 + 2\sum_{\tau-1}^{m-1} R(\tau)\cdot\cos\left(\frac{\pi\tau f}{f_c}\right) + R_m\cdot\cos\left(\frac{\pi m f}{f_c}\right)\right],$$

где h – интервал времени отсчета; R(τ) – оценка корреляционной функции при шаге τ; m – число шагов корреляционной функции; $f_c = \frac{1}{2h}$ - частота среза; *f*- задаваемая исследуемая частота; *G(f)* – величина плотности спектральной функции при исследуемой частоте *f*.

Расчет численных значений корреляционной функции, и спектральной плотности производится на основе профилограммы поверхности и представляет достаточно трудоемкую операцию, которую

следует выполнять на ЭВМ. Для расчета их значений попутно решаются такие задачи математической статистики, как:

- расчет среднего значения функции профиля;
- расчет R_z;
- расчет среднеарифметического значения R_a;
- определение среднего шага неровностей S_m;
- относительная длина опорной линии профиля на заданном уровне;
- относительная площадь опорной поверхности на заданном уровне;
- и другие.

3. Методика проведения работы

Исходными данными для проведения работы и статистического анализа являются профилограмма поверхности детали, полученная методом лезвийной или абразивной обработки с заданными режимами резания.

Для выполнения работы профилограмму необходимо разбить на интервалы таким образом, чтобы величина интервала была в 2 раза больше самого малого цикла профилограммы. Общее количество интервалов на профилограмме не должно превышать 250 шт.

Затем производится измерение ординаты каждого интервала (с точностью до 0,5 мм), численные значения заносятся в специальную таблицу.

Таблица

Значение ординат профиля поверхности

№ п/п	Величина ординаты профиля	№ п/п	Величина ординаты профиля
1			
2			
3			

На ЭВМ рассчитывается корреляционная функция и спектральная плотность. Значения ординат профилограммы вводятся в качестве исходных данных в порядке их замера. Кроме этих данных в программу вводятся (предварительно рассчитанные) следующие данные:

- интервал дискретности h_c;
- максимальное число шагов для расчета корреляционной функции m;
- масштаб увеличения профилограммы $M_в$ в вертикальном направлении.

При окончании машинного расчета и определения значений корреляционной функции и спектральной плотности, строятся соответствующие графики $R(\tau)$ и $G(\tau)$.

Подготовка данных вводимых в ЭВМ

Кроме значений ординат профилограммы, для получения результатов в абсолютных единицах необходимо подготовить рассчитать Другие данные, например:

1.Интервал дискретности (величина интервала профилограммы) определяется после того, как вся профилограмма разбивается на интервалы. Для определения длительности интервала h используем выражение:

$$h = \frac{L_{пр}}{V_{пр} k},$$

где $L_{пр}$ –длина профилограммы; $V_{пр}$ – скорость перемещения при записи шероховатости, выбирается из ряда; k – количество интервалов на профилограмме.

2. Число шагов для расчета корреляционной функции. В общем случае количество расчетных точек для определения корреляционной функции должно быть оптимальным. Занижение числа расчетных точек опасно получением ошибочной зависимости корреляционной функции (и ошибкой конечного результата) и наоборот, слишком большое количество расчетных точек неоправданно усложняют расчеты.

между объемом выборки (количеством значений ординат профилограммы N) и max числом шагов корреляционной функции существует зависимость следующего вида:

$$m = N\varepsilon_r^2$$

где ε_r^2 - нормированная стандартная ошибка, задаваемая при расчете спектра (не должна превышать 0,1). Принимаем 0,05-0,10.

3. Масштаб увеличения профилограммы (вертикальное направление) $M_в$ определяет собой величину R_a, R_z и другие характеристики шероховатости и задается при записи профилограммы оператором. Величина $M_в$ задается преподавателем из ряда.

4. Обработка полученных результатов заключается в следующем определении законов изменения корреляционной функции и расчета основных характеристик профиля:

$$R_a, R_z, S_m, R_0, \sigma_\gamma, T_\gamma, \sigma_\beta, T_\beta, \gamma, T$$

l_p – относительная длина опорной линии профиля на заданном уровне (для p = 5-50%).

4.1.Определение закона измерения корреляционной функции, характеристик случайной и регулярной компоненты в профиле поверхности.

Определение закона изменения корреляционной функции производится в 3 этапа.

1 этап – визуальное сравнение графика корреляционной функции, полученной при обработке профилограммы. За основу принимаем закон, в наибольшей степени приближающийся к теоретической кривой.

2 этап – расчет параметров корреляционной функции на основе графических данных.

На данной стадии в зависимости от принятого закона изменения корреляционной функции необходимо найти численные значения коэффициентов. Так, если вид закона описывается зависимостью

$$R(\tau) = ce^{-\alpha\tau}\cos\beta\tau$$

определению подлежат коэффициенты c, α, β. Как известно, для определения трех неизвестных, необходимо иметь три уравнения. Получим эти уравнения, используя графическую зависимость. Для этого зададимся тремя значениями τ в наиболее характерных точках графика. Такими точками являются:

1) $\tau_1 = 0$ ордината начального значения функции;
2) $\tau_2 = \tau_{впад}$ ордината, соответствующая первой впадине функции;
3) $\tau_3 = \tau_{выст}$ ордината, соответствующая первому выступу.

Определим значения $R_{(0)}$, $R_{(1)}$, $R_{(2)}$ соответствующие значениям τ_1, τ_2, τ_3. Получим три разных уравнения, решая которые определим численные значения искомых коэффициентов c, α, β.

Случайную функцию $R_\gamma(\tau)$ можно определить следующим образом. В графике случайная составляющая будет представлять собой кривую проведенную через выступы (рис.3).

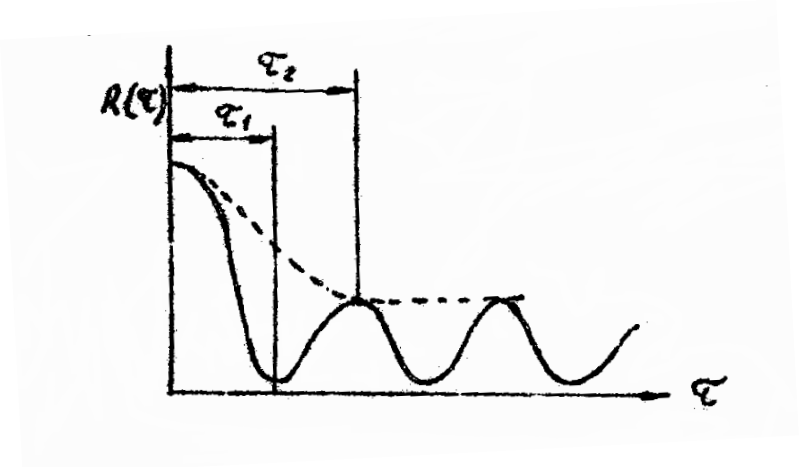

Рис. 3. Определение случайной составляющей в корреляционной функции

2) Задаваясь значениями τ (например $\tau_1 = 0$, $\tau_2 = \tau_{впад}$, $\tau_3 = \tau_{выст}$), определяем из графика для каждого из них соответствующее значение R(τ). Решая систему уравнения, определим значения c,α. Для τ = 0 рассчитаем $R_\gamma(\tau_0) = \sigma^2\gamma$.

   Соответственно $\sigma^2\beta = R(\tau_0) - \sigma_\gamma^2$

Уровень случайной составляющей γ определим из соотношения

$$\gamma = \sigma_{\gamma}^{2} / 2(\tau_0).$$

Уровень регулярной составляющей β найдем из соотношения

$$\beta = \sigma_{\beta}^{2} / R(\tau).$$

3 этап – проверка полученной зависимости по критерию Пирсона (методика приведена в методических указаниях к лабораторной работе «Статистические методы исследования точности обработки»). На этом этапе окончательно принимается или опровергается решение корреляционной функции.

5. Порядок проведения работы

1.Получить профилограмму обработанной поверхности у преподавателя.
2. Определить величину интервала квантования профилограммы и произвести измерение 250 точек профилограммы. Данные занести в таблицу.
3. Ввести исходные данные для расчета и получить расчет на ЭВМ основных характеристик профиля и данных для построения корреляционной функции и спектральной плотности.
4. По расчетным точкам построить корреляционную функцию и функцию спектральной плотности.
5. Определить характеристики корреляционной функции.
6. Составить отчет по работе.

6.Содержание отчета

1. Краткая теоретическая часть.
2. Таблица данных профилограммы.
3. Распечатка результатов ЭВМ.
4. Кривая корреляционной функции и спектральной плотности.
5. Определение характеристик корреляционной функции профиля обработанной поверхности.

7. Вопросы для самопроверки

1. Какую информацию несет корреляционная функция и функция спектральной плотности?
2. Какая связь существует между параметрами корреляционной функции и технологическими характеристиками процесса резания?

3. Как в структуре корреляционной функции выделить долю случайной и регулярной составляющей?
4. Основные характеристики профиля обработанной поверхности?
5. Как получить профилограмму поверхности?

Литература

1. Хусу А.П. Шероховатость поверхности (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Виттенберг, В.А. Пальмов. М.: Наука. 1975. 438с.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Основы технологии машиностроения» для студентов направлений 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 15.03.01 «Машиностроение» дневной и заочной форм обучения

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

№	Аналитическая зависимость	Вид корреляционной функции
1	$R(\tau) = R_0 \cdot e^{-\alpha\tau}$	
2	$R(\tau) = R_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_\beta}\tau\right)$	
3	$R(\tau) = c \cdot e^{-\alpha\tau} \cos(\beta\tau)$	
4	$R(\tau) = c \cdot (\gamma e^{-\alpha\tau} + \beta \cdot \cos(\beta\tau))$	