

УДК 621.9:519.242

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.007

Планирование и обработка результатов экспериментов при шлифовании

Каширская Елизавета Натановна

МИРЭА – Российский технологический университет,
Россия, Москва, liza.kashirskaya@gmail.com

Аннотация. Качество поверхности детали, образованной технологическим процессом резания, оценивается геометрическими и физико-механическими параметрами. Шлифование используется, как конечная операция обработки, в связи с чем наибольшую важность приобретает точность полученной поверхности. В понятие точности входят три составляющих: отклонение формы и расположения поверхности, волнистость и шероховатость. В статье излагаются результаты исследования влияния режимов шлифования на один из показателей точности обработки резанием – шероховатость шлифованной поверхности.

Ключевые слова: шлифование, режимы резания, подача, скорость подачи, глубина резания, планирование эксперимента, статистическая обработка

Цитирование: Каширская Е.Н. Планирование и обработка результатов экспериментов при шлифовании / Е.Н. Каширская // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2 (38). – С. 83-89. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.007.

Введение. Исследованием качества поверхности заготовки, обработанной шлифованием, занимались и занимаются многие авторы. Так, например, статья [1] посвящена исследованию влияния режимов шлифования на качество поверхности. Авторы представили некоторые результаты экспериментального исследований процесса шлифования деталей на качество поверхностей. Статья [2] посвящена изучению связи шероховатости поверхности с силой резания при глубинном шлифовании. В ней показана связь значения параметров шероховатости [3] с длиной шлифованной поверхности, от которой зависит накопленная сила резания. Авторы работы [4], рассматривая круглое шлифование, на основании проведенных экспериментальных исследований пришли к выводу о значительном влиянии режимов резания на геометрию поверхности, обработанной шлифовальным кругом. Результаты теоретического исследования качества поверхности детали при шлифовании [5] свидетельствуют о значительном влиянии режимов резания на результат обработки заготовки. Общим вопросам обеспечения точности при шлифовании посвящена работа [6], в которой разработаны математические модели точности круглого шлифования с учетом динамики и кинематики процесса обработки. В работе [7] приведены результаты экспериментального исследования качества поверхности, обработанной шлифованием и определены диапазоны скоростей резания, обеспечивающие снижение шероховатости.

Приведенные в данном обзоре работы, а также многие другие свидетельствуют о важности разработки общей методики определения влияния режимов резания на качество шлифованной поверхности.

Качество поверхности обработанной детали определяется тремя параметрами: геометрической точностью, шероховатостью и физико-механическими свойствами поверхностного слоя. Понятие точности включает в себя допуск на отклонения формы и расположения поверхностей [8]. Физико-механические свойства поверхностного слоя определяются величиной остаточных напряжений и глубиной наклепа. Влияние большого числа технологических факторов на формирование характеристик качества поверхности при обработке материалов резанием затрудняет оценку зависимости отдельных параметров качества от режимов обработки. Получение более полных зависимостей возможно на базе современных математических методов планирования эксперимента и дальнейшей обработки полученных результатов [9].

Исследование проводится на примере плоского шлифования [10] периферией шлифовального круга на станке с прямоугольным столом (Рис. 1).

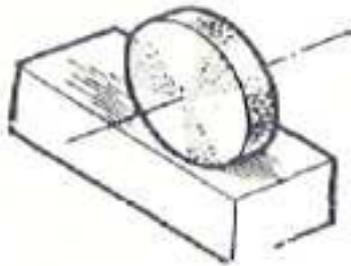


Рис.1. Схема плоского шлифования

Шлифование, как правило, является финишной обработкой заготовки и формирует наиболее важный параметр качества обработанной поверхности – ее шероховатость [4].

ГОСТ [11] устанавливает основные требования к шероховатости поверхности детали и регламентирует параметры шероховатости, наиболее значимыми из которых являются Ra – среднее арифметическое отклонение профиля и Rz – высота неровностей профиля по десяти экстремальным точкам.

В настоящих исследованиях рассматривалось влияние скорости продольной подачи детали V , поперечной подачи S и глубины шлифования t на шероховатость шлифованной поверхности (параметр Ra – среднее арифметическое отклонение профиля).

Для исследования принят полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^3 , так как рассматриваются три независимых параметра процесса шлифования.

1. Выбор математической модели. Существуют три конкурирующие гипотезы выбора математической модели, отображающие взаимосвязь между параметрами технологического процесса и результатами процесса шлифования:

- 1-я гипотеза – математическая модель первого порядка,
- 2-я гипотеза – математическая модель второго порядка,
- 3-я гипотеза – математическая модель в виде степенной функции.

Вид зависимости шероховатости поверхности от параметров режима резания известен из теории резания. Эта зависимость имеет следующий вид:

$$Ra = C_{Ra} V^{x_1} S^{x_2} t^{x_3}, \quad (1)$$

где Ra – среднее арифметическое значение всех абсолютных расстояний профиля шероховатости от центральной линии в пределах длины измерения, мкм,

V – скорости продольной подачи детали, м/мин,

S – поперечная подача, мм/ход стола,

t – глубина шлифования, мм,

C_{Ra} – коэффициент пропорциональности.

Это позволяет принять математическую модель по 3-ей гипотезе. В этом случае задачей эксперимента является определение коэффициентов, входящих в формулу (1).

2. Линеаризация математической модели. Для вычисления коэффициентов расчетных зависимостей математическая модель (1) мультипликативного типа с помощью логарифмирования приводится к линейному виду следующим образом:

$$\ln Ra = C_{Ra} + x_1 \ln V + x_2 \ln S + x_3 \ln t. \quad (2)$$

Введем новые обозначения:

$$y = \ln Ra, \quad x_0 = \ln C_{Ra}, \quad b_1 = \ln V, \quad b_2 = \ln S, \quad b_3 = \ln t.$$

С учетом вновь введенных обозначений формула (2) сводится к виду:

$$y = x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3. \quad (3)$$

3. Планирование проведения трехфакторного эксперимента. Прежде чем получать и обрабатывать опытные данные, определимся с уровнями их значимости. Уровни значимости для опытных данных закодированы специальным образом: нижний уровень соответствует -1 (обозначен как минус), а верхний +1 (обозначен как плюс). Кодовые обозначения в серии опытов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Кодовые обозначения			
	x_0	x_1	x_2	x_3
1	+	-	-	-
2	+	-	-	+
3	+	+	-	-
4	+	+	-	+
5	+	-	+	-
6	+	-	+	+
7	+	+	+	-
8	+	+	+	+

4. Вычисление коэффициентов математической модели. Вычисление коэффициентов x_0, b_1, b_2, b_3 математической модели (3) рассматриваемого процесса производится методом наименьших квадратов при помощи регрессионного анализа. Задачей исследовательских расчетов является определение коэффициентов зависимости (3), при этом необходимо оценить значимость полученных в эксперименте результатов [12].

В исследовании выполняется статистическая оценка результатов опыта по двум критериям. Оценка воспроизводимости опытов проводится по критерию Кохрена [13], характеризующему допустимое расхождение результатов измерений. Оценка значений полученных параметров проводится по критерию Фишера, с помощью которого сопоставляется дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта) с дисперсией адекватности (ошибка, появляющаяся при сравнении эмпирических данных с данными, рассчитанными по принятой зависимости).

5. Статистическая обработка результатов эксперимента. Обработка результатов экспериментов проводится в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Ввод исходных данных:

- a) m – число параллельных опытов;
- b) табличное значение критерия Кохрена при 5%-ном уровне значимости $G(0,05; f; f_i) = 0,5157$, где $f_n = 8$ – число независимых оценок дисперсии, $f_i = 2$ – число степеней свободы каждой оценки;
- c) табличное значение критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости $F(0,05; f_{ад}; f_i) = 3,0069$, где $f_{ад} = 4$ – число степеней свободы дисперсии адекватности, $f_i = 16$ – число степеней свободы дисперсии воспроизводимости;
- e) коэффициент матрицы планирования X_{ij} ;
- f) экспериментально полученные значения Ra :

$$Y_i \text{ при } 1 \leq i \leq 8, 1 \leq k \leq m.$$

2. Вычисление среднего значения шероховатости на i -ом сочетании уровней факторов:

$$Y_{cp\ i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m Y_{ik}.$$

3. Определение дисперсии, характеризующей рассеяние результатов опытов на i -ом сочетании уровней факторов:

$$s_i^2 = \frac{\sum_{k=1}^m (Y_{ik} - Y_{cp\ i})^2}{m - 1}$$

4. Выявление наибольшей из дисперсий в строчках плана:

$$s_{i\ max}^2.$$

5. Проверка воспроизводимости опытов по критерию Кохрена:

а) вычисление критерия Кохрена $G = \frac{s_{i\ max}^2}{\sum_{i=1}^8 s_i^2}$, где $n=8$ – число строчек плана;

б) сравнение G и $G(0,05; fn; fi)$: процесс считается воспроизводимым, если $G \leq G(0,05; fn; fi)$; если $G > G(0,05; fn; fi)$, следует уточнить измерения в опыте с максимальной дисперсией;

с) определение дисперсии воспроизводимости $s_Y^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 s_i^2}{m}$, где $n=8$ – число строчек плана.

6. Расчет коэффициентов регрессии для воспроизводимого процесса:

$$x_0 = \frac{\sum_{k=1}^n \ln Y_{k\ cp}}{n}, \quad b_i = \frac{\sum_{k=1}^n x_{ij} \ln Y_{k\ cp}}{n},$$

где $j = 1, 2, 3$, то есть $j \leq k$,

k – количество столбцов плана.

7. Определение параметров расчетной зависимости $Y = a_0 V^{a_1} S^{a_2} t^{a_3}$.

8. Определение расчетных значений отклика Y_i в каждом из n опытов.

9. Проверка адекватности модели по критерию Фишера:

а) нахождение $s_{ад}^2 = \frac{\sum_{k=1}^8 (Y_{cp\ i} - Y)^2}{n - k - 1}$;

б) вычисление критерия Фишера $F = \frac{s_{ад}^2}{s_Y^2}$;

с) сравнение F и $F(0,05; fад; fi)$: адекватность считается обоснованной,

д) если $F \leq F(0,05; fад; fi)$; если $F > F(0,05; 4; 16)$, следует уточнить измерения.

10. Расчет по полученной формуле $Y = a_0 V^{a_1} S^{a_2} t^{a_3}$ зависимости Y от V, S, t и публикация результатов.

Постоянные коэффициенты и показатели степеней для исследованных условий шлифования сталей 12ХН3А и 7ХГ2ВМ приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры обрабатываемого и инструментального материалов

Обрабатываемый материал	Характеристика шлифовального круга	R_a , мкм			
		C_{Ra}	x_1	x_2	x_3
12ХН3А	24А16	0,514	0,213	0,342	0,204
	24А25	0,617	0,237	0,523	0,175
	Л0Л10	0,525	0,157	0,198	0,202
	Л0Л25	0,458	0,133	0,240	0,126
7ХГ2ВМ	24А16	0,539	0,114	0,239	0,299
	24А25	1,267	0,163	0,442	0,312
	Л0Л10	0,893	0,174	0,236	0,290
	Л0Л25	0,801	0,188	0,238	0,299

В таблице 3 приведены максимальные и минимальные значения шероховатости, полученные в исследованном диапазоне режимов резания абразивными и эльборовыми кругами.

Таблица 3. Зависимость шероховатости от режимов шлифования

Обрабатываемый материал	Характеристика шлифовального круга	Режимы шлифования			R_a , мкм	
		V , м/с	S , мм/ход	t , мм	max	min
12ХН3А	24А16	0,083	0,5	0,002	-	0,067
		0,333	3	0,010	0,232	-
	24А25	0,083	0,5	0,002	-	0,080
		0,333	3	0,010	0,376	-
	ЛОЛ10	0,033	0,2	0,005	-	0,077
		0,133	1	0,015	0,164	-
ЛОЛ25	0,033	0,2	0,005	-	0,101	
	0,133	1	0,015	0,20	-	
7ХГ2ВМ	24А16	0,083	0,5	0,002	-	0,085
		0,333	3	0,010	0,248	-
	24А25	0,083	0,5	0,002	-	0,089
		0,333	3	0,010	0,410	-
	ЛОЛ10	0,033	0,2	0,005	-	0,073
		0,133	1	0,015	0,187	-
ЛОЛ25	0,033	0,2	0,005	-	0,085	
	0,133	1	0,015	0,208	-	

Заключение. Проведенное исследование экспериментально подтвердило, что характеристики шлифовальных кругов и режим резания оказывают существенное влияние на величину шероховатости обработанной поверхности. В исследованном диапазоне режимов резания величина шероховатости по параметру R_a изменяется в 2,0...4,6 раза в зависимости от условий шлифования. Можно отметить, что наибольшее влияние на величину шероховатости шлифованной поверхности оказывает глубина резания при использовании мелкозернистых кругов (как электрокорундовых, так и эльборовых) и поперечная подача при работе более крупнозернистыми кругами.

Увеличение глубины резания и продольной подачи предопределяет повышение удельной работы каждого зерна, увеличение съема металла в единицу времени, возрастание сил резания и упругих деформаций технологической системы станка, вследствие чего ухудшается класс шероховатости обработанной поверхности.

Величина продольной подачи также оказывает влияние на величину шероховатости. Повышение продольной подачи при неизменной глубине резания и поперечной подаче приводит к увеличению объема снимаемого металла, повышению толщины снимаемого одним зерном слоя и, как следствие, к увеличению шероховатости.

Список источников

1. Гулюшев Д.Ю. Исследование влияния режимов шлифования на качество поверхности. / Д.Ю. Гулюшев, Т.В. Рябкина, О.Н. Старостин // Социально-экономические и технические проблемы оборонно-промышленного комплекса России: история, реальность, инновации: Межвузовский сборник статей по материалам VII Всероссийской научно-практической конференции. – Нижний Новгород, НГТУ, 2021. – С. 169-174. – EDN CFDSEZ.
2. Кременецкий Л.Л. Шероховатость поверхности и сила резания при шлифовании титанового сплава кругами различной твердости / Л.Л. Кременецкий, Н.Д. Сердюков // Современные наукоемкие технологии, 2023. – № 8. – С. 39-44. – DOI: 10.17513/snt.39728.
3. ГОСТ 25142-73. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – Введ. 1982. – М.: Изд-во стандартов, 1982.
4. ГОСТ 2.309-73. Обозначения шероховатости поверхностей. – Введ. 1973. – М.: Изд-во стандартов, 1973.
5. Яшков В.А. Обеспечение качества поверхности при внутреннем шлифовании / В.А. Яшков, Л.В. Силин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение, 2011. – С. 62-71.

6. Ломова О.С. Управление процессом формообразования на круглошлифовальных станках для обеспечения требуемой точности обработки: Дисс. ... д.т.н. по спец. 05.02.07 / Ломова Ольга Станиславовна, Омский государственный технический университет, 2013. 367 с.
7. Аверков К.В. Повышение качества обработанной поверхности при шлифовании жаропрочных сплавов на никелевой основе / К.В. Аверков, Д.С. Реченко // Омский научный вестник, 2011. – С. 36-39.
8. ГОСТ 28187-89. Отклонения формы и расположения поверхностей. – Введ. 1990. – М.: Изд-во стандартов, 1990.
9. Херцог М.Ф. Статистика и планирование эксперимента / М.Х. Херцог, Г. Френсис, А. Кларк. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 174 с.
10. Шумячер В.М. Шлифование. Теория и практика: монография / В.М. Шумячер, С.А. Крюков, Н.В. Байдакова // Волжский: ВПИ ВолгГТУ, 2019. – Т. 1. – 233 с. – EDN XZZQHS.
11. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. Введ. 1973. – М.: Изд-во стандартов, 1973.
12. Падве В.А. Элементы теории вероятностей и математической статистики / В.А. Падве. – Новосибирск: СГГА, 2013. – 209 с.
13. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Введ. 2002. – М.: Изд-во стандартов, 2002.

Каширская Елизавета Натановна. К.т.н., доцент, заместитель заведующего кафедрой промышленной информатики МИРЭА – Российского технологического университета. Основные направления исследований связаны с автоматизацией технологических процессов и производств в промышленности. AuthorID: 493904, SPIN: 3570-7148, ORCID: 0000-0001-5870-3786, Liza.kashirskaya@gmail.com, 119454, Россия, Москва, проспект Вернадского, 78.

UDC 621.9:519.242

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.007

Planning and processing of experimental results during grinding

Elizaveta N. Kashirskaya

MIREA – Russian technological university,
Russia, Moscow, liza.kashirskaya@gmail.com

Abstract. The quality of the surface of a part formed by the technological process of cutting is assessed by geometric and physical-mechanical parameters. Grinding is used as the final processing operation, in connection with which the accuracy of the obtained surface acquires the greatest importance. The concept of accuracy includes three components: deviation of the shape and location of the surface, waviness and roughness. The article presents the results of a study of the influence of grinding modes on one of the indicators of cutting accuracy – the roughness of the ground surface.

Keywords: grinding, cutting conditions, feed, feed rate, cutting depth, experimental design, statistical processing

References

1. Gulyushev D.Yu., Ryabikina T.V., Starostin O.N. Issledovaniye vliyaniya rezhimov shlifovaniya na kachestvo poverkhnosti [Study of the influence of grinding modes on surface quality]. Sotsial'no-ekonomicheskiye i tekhnicheskiye problemy oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii: istoriya, real'nost', innovatsii: Mezhvuzovskiy sbornik statey po materialam VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – Nizhniy Novgorod, NGTU [Socio-economic and technical problems of the defense-industrial complex of Russia: history, reality, innovation: Interuniversity collection of articles based on the materials of the VII All-Russian scientific and practical conference. – Nizhny Novgorod, NSTU], 2021, pp. 169-174, EDN CFDSEZ.
2. Kremenetskiy L.L., Serdyukov N.D. Sherokhovatost' poverkhnosti i sila rezaniya pri shlifovanii titanovogo splava krugami razlichnoy tverdosti [Surface roughness and cutting force at grinding titanium alloy by wheels with different hardness grade]. Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii [Modern science-intensive technologies], 2023, no. 8, pp. 39-44, DOI: 10.17513/snt.39728.
3. GOST 25142-73. Sherokhovatost' poverkhnosti. Terminy i opredeleniya, Vved. 1982 [GOST 25142-73. Surface roughness. Terms and definitions, Introduced, 1982]. M.: Izd-vo standartov [M.: Publishing house of standards], 1982.

4. GOST 2.309-73. Oboznacheniya sherokhovatosti poverkhnostey, Vved. 1973 [GOST 2.309-73. Surface roughness designations, Introduced 1973]. М.: Izd-vo standartov [M.: Publishing house of standards], 1973.
5. Yashkov V.A., Silin L.V. Obespecheniye kachestva poverkhnosti pri vnutrennem shlifovanii [Ensuring surface quality during internal grinding]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, Mashinostroyeniye, materialovedeniye [Bulletin of Perm national research polytechnic university, Mechanical engineering, materials science], 2011, pp. 62-71.
6. Lomova O.S. Upravleniye protsessom formoobrazovaniya na krugloshlifoval'nykh stankakh dlya obespecheniya trebuyemoy tochnosti obrabotki: Diss. ... d.t.n. po spets. 05.02.07 [Control of the shaping process on cylindrical grinding machines to ensure the required processing accuracy: Diss. ... Doctor of Technical Sciences in specialty. 05.02.07], 2013, 367 p.
7. Averkov K.V., Rechenko D.S. Povyseniye kachestva obrabotannoy poverkhnosti pri shlifovanii zharoprochnykh splavov na nikelovoy osnove [Improving the quality of the processed surface when grinding heat-resistant nickel-based alloys]. Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk scientific bulletin], 2011, pp. 36-39.
8. GOST 28187-89. Otkloneniya formy i raspolozheniya poverkhnostey, Vved. 1990 [GOST 28187-89. Deviations in shape and location of surfaces, Introduced 1990]. М.: Izd-vo standartov [M.: Publishing house of standards], 1990.
9. Herzog M.F., Francis G., Clark A. Statistika i planirovaniye eksperimenta [Statistics and experimental design]. М.: DMK Press [Moscow: DMK Press], 2023, 174 p.
10. Shumyacher V.M., Kryukov S.A., Baidakova N.V. Shlifovaniye. Teoriya i praktika: monografiya [Grinding. Theory and practice: monograph]. Volzhskiy: VPI VolgGTU [Volzhsky: VPI VolGTU], 2019, vol. 1, 233 p., EDN XZZQHS.
11. GOST 2789-73. Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry, kharakteristiki i oboznacheniya, Vved. 1973. [GOST 2789-73. Surface roughness. Parameters, characteristics and designations, Introduced 1973]. М.: Izd-vo standartov [M.: Publishing house of standards], 1973.
12. Padve V.A. Elementy teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki [Elements of probability theory and mathematical statistics]. Novosibirsk: SGGA [Novosibirsk: SGGA], 2013, 209 p.
13. GOST R ISO 5725-2-2002. Tochnost' (pravil'nost' i pretsizionnost') metodov i rezul'tatov izmereniy. Vved. 2002 [GOST R ISO 5725-2-2002. Accuracy (correctness and precision) of measurement methods and results. Introduced 2002]. М.: Izd-vo standartov [M.: Publishing house of standards], 2002.

Kashirskaya Elizaveta Natanovna. Ph.D, associate professor, deputy head of the department of industrial informatics at MIREA - Russian technological university. The main directions of research are related to the study of wear of metal-cutting tools. AuthorID: 493904, SPIN: 3570-7148, ORCID: 0000-0001-5870-3786, Liza.kashirskaya@gmail.com, 119454, Russia, Moscow, 78, Vernadskogo Avenue.

Статья поступила в редакцию 14.02.2025; одобрена после рецензирования 24.04.2025; принята к публикации 29.04.2025.

The article was submitted 02/14/2025; approved after reviewing 04/24/2025; accepted for publication 04/29/2025.