

УДК 621.91.01
DOI 10.17513/snt.40370

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЧИСТОВОМ ТОЧЕНИИ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Чигиринский Ю.Л., Зебазе Н.Ж.А., Чигиринская Н.В.,
Норченко П.А., Демченко И.К.

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, e-mail: ndjaze@gmail.com

Представлены результаты статистического моделирования микрогеометрии поверхности, полученные при экспериментальном исследовании влияния технологических условий чистовой и получистовой токарной обработки. Целью исследования было выявить перечень элементов режима резания и других технологических условий обработки, в наибольшей степени определяющих состояние обработанной поверхности. Исследовано влияние технологических условий обработки при продольном наружном чистовом точении заготовок из углеродистой стали в состоянии нормализации. В качестве технологических условий рассмотрены глубина резания, скорость продольной подачи, скорость резания. При построении статистических регрессионных моделей учтено попарное взаимовлияние исходных независимых технологических факторов. Для оценки статистической значимости технологических условий обработки и их условных взаимодействий применен критерий Стьюдента. Статистическая достоверность (адекватность) моделирования оценена по критерию Фишера. Погрешность моделирования определена средним абсолютным значением относительной погрешности в сравнении с экспериментальными данными. Выбрана рациональная математическая спецификация регрессионной модели. Критерии выбора: минимальная относительная погрешность и максимальная статистическая адекватность модели. В соответствии с критериями адекватности и минимальной погрешности моделирования, а также в силу традиционных в технологическом проектировании представлений обосновано применение степенной функции нескольких переменных в качестве модели процесса формирования шероховатости.

Ключевые слова: шероховатость, токарная обработка, математическая модель, процесс обработки, оценка влияния, технологические условия обработки

STATISTICAL MODELING OF SURFACE ROUGHNESS WITH FINISH TURNING OF CARBON STEEL

Tchigirinsky Ju.L., Zebaze N.G.A., Chigirinskaya N.V.,
Norchenko P.A., Demchenko I.K.

Volgograd State Technical University, Volgograd, e-mail: ndjaze@gmail.com

The results of statistical modeling of surface microgeometry obtained during an experimental study of the influence of technological conditions of finishing and semi-finishing turning are presented. The purpose of the study is to identify the list of elements of the cutting mode and other processing conditions that most determine the condition of the treated surface. The influence of technological processing conditions during longitudinal external finishing turning of carbon steel edges in a state of normalization is investigated. The following technological conditions are considered: cutting depth, longitudinal feed rate, cutting speed. When constructing statistical regression models, the pairwise interaction of the initial independent technological factors is taken into account. To assess the statistical significance of the technological conditions of processing and their conditional interactions, the Student's criterion was applied. The statistical reliability (adequacy) of the modeling is assessed according to the Fisher criterion. The modeling error is determined by the average absolute value of the relative error in comparison with the experimental data. A rational mathematical specification of the regression model is chosen. Selection criteria: minimum relative error and maximum statistical adequacy of the model. In accordance with the criteria of adequacy and minimum error of modeling, as well as due to traditional concepts in technological design, the use of a power function of several variables as a model of the roughness formation process is justified.

Keywords: roughness, turning, mathematical model, machining, effect assessment, processing conditions

Введение

Исследования в области механической обработки сосредоточены на двух аспектах: первый касается технологических разработок, направленных на повышение производительности и качества готовых деталей, второй – моделирование, которое используется для прогнозирования сил резания, температурных полей и свойств готовых поверхностей. На современном этапе развития технологий проектирования эффективность работы металлорежущего оборудования

во многом зависит от свойств и стабильности свойств материалов режущего инструмента, заготовки, характеристик других элементов технологической системы [1-3].

Изучение физических явлений, сопровождающих процессы механической лезвийной обработки и, соответственно, изучение закономерностей формирования свойств обработанной поверхности, традиционно проводится [3, 4] на примере токарной обработки. Такой подход был принят, поскольку, во-первых, однолезвийное точение «избавлено»

от комплекса усложняющих взаимодействий [5-7], связанных с одновременной работой нескольких режущих лезвий или сложностью геометрической формы обрабатываемой поверхности. Во-вторых, токарная обработка до настоящего времени остается наиболее распространенным [6, 8] методом механической лезвийной обработки.

Моделирование результатов обработки проведено на примере углеродистой стали С1018 (сталь 20 по ГОСТ 1050-2013). В процессе токарной обработки основные причины шероховатости поверхности связаны с тремя аспектами: геометрическими и физическими [6, 7] причинами и изменениями условий резания [5, 8] в процессе обработки. Рассмотрены три спецификации регрессионных моделей [9], наиболее часто применяемые в инженерном проектировании:

$$\text{линейная} \quad R = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i \Phi_i; \quad (1)$$

$$\text{степенная} \quad R = C_0 \prod_{i=1}^n \Phi_i^{C_i}; \quad (2)$$

$$\text{показательная} \quad R = C_0 \prod_{i=1}^n C_i^{\Phi_i}; \quad (3)$$

где R – функция отклика; в данной работе в качестве функции отклика рассматривает-

ся среднее арифметическое отклонение высоты микронеровностей Ra ;

C_i – коэффициенты регрессионной модели;

$C_i > 0$ – зависимость возрастающая, при увеличении значения фактора значение функции увеличивается;

$C_i < 0$ – зависимость убывающая, при увеличении значения фактора значение функции уменьшается;

$C_i \approx 0$ – зависимость отсутствует, аргумент не оказывает влияния на функцию;

Φ_i – независимые переменные многофакторной регрессионной модели (факторы): технологические условия обработки: скорость резания V , глубина резания t и скорость продольной подачи S , предположительно оказывающие влияние на формирование качества поверхности;

n, i – соответственно количество и текущий номер рассматриваемых факторов.

Входные факторы должны удовлетворять условию взаимной независимости [9], что формально проверяется по величине абсолютного значения коэффициентов парной корреляции (табл. 1) «фактор – фактор» – величина коэффициента должна быть малой.

Помимо независимых факторов, названных выше, в регрессионных моделях учтено влияние взаимодействий [9] – рассмотрены псевдофакторы, образованные попарными сочетаниями независимых объясняющих переменных [10].

Таблица 1

Коэффициенты парной корреляции

Коэффициенты парной корреляции «фактор – фактор» и «фактор – функция отклика»

Ф2	Ф3	R	
0,0000	0,0000	-0,2374	Ф1
	0,0000	0,0519	Ф2
		-0,7765	Ф3

Цель исследования – выделить группы наиболее значимых по степени влияния на шероховатость технологических условий обработки, определяющих закономерности и результаты формирования микрорельефа обработанной поверхности.

Материалы и методы исследования

Теория регрессионного анализа позволяет анализировать и оценивать данные, полученные в результате моделирования. Функция отклика дает возможность каче-

ственно сравнить коэффициенты регрессии объясняющих факторов, затем выявить их влияние и, наконец, лучше понять закономерности в процессе формирования высоты микрорельефа обработанной поверхности Ra . Эта теория использована для анализа и оценки факторов, участвующих в процессе механической однолезвийной обработки [11, 12].

С учетом результатов, полученных ранее [5-7], сделано допущение о нелинейном характере зависимости высоты микро-

неровностей от технологических условий обработки. С учетом такого допущения план исследований для построения модели включает эксперименты [13, 14, 15] с тремя уровнями вариации факторов. Нормированные значения переменных модели равны $[-1; 0; +1]$. Реальные значения соответствующих физических величин при проведении определяются нормирующими соотношениями. Минимальное количество экспериментов, проведенных при различных неповторяющихся сочетаниях условий обработки, необходимое для построения модели [9, 11], составляет для трех независимых факторов V, S, t : $3^3 = 27$.

Условия обработки – продольное наружное чистовое точение *заготовок* из холоднокатаной углеродистой стали С1018. Глубина резания $t = 0,5 \dots 0,7$ мм, двухкарбидный твердый сплав Т15К6. Геометрия режущей части инструмента:

$$\gamma = 0^\circ, \alpha = \alpha_1 = 10^\circ, \phi = 45^\circ,$$

$$\phi_1 = 25^\circ, r = 0,3 \dots 0,4 \text{ мм.}$$

Результаты исследования и их обсуждение

Регрессионный анализ проводится в форме статистического исследования результатов эксперимента. Целью регрессионного анализа является определение перечня технологических факторов и их

взаимодействий, оказывающих статистически значимое влияние на шероховатость поверхности (Ra). Критерии выбора модели, обеспечивающей наиболее качественное [11] описание процесса: стандартное отклонение; средняя относительная погрешность; F-критерий Фишера; оценка адекватности модели – вероятность существования выявленной зависимости.

В таблице 2 приведен план проведения экспериментальных исследований [8]. Условия резания, используемые для испытаний, изменяются в следующих диапазонах: $V = [50-120]$ м/мин; $S = [0,08-0,16]$ мм/об; $t = [0,5-0,7]$ мм.

Функциональная связь между входными параметрами (V, S и t) и выходными параметрами (Ra), определяемыми как параметры технологической обработки, называется регрессией. Отметим, что для обеспечения корректности регрессионного моделирования необходимо, чтобы для переменных величин, входящих в модель, выполнялся комплекс условий [9, 11] Гаусса–Маркова. Для обеспечения этих условий производится операция нормирования [11]. Способ нормирования определяется спецификацией исходной модели.

В результате нормирования математические зависимости (1), (2), (3) рассматриваемых спецификаций принимают линейный вид (4).

$$\text{линейная} \quad Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad (4)$$

где Y – функция отклика нормированной модели;

X_i – независимые переменные нормированной модели;

a_i – коэффициенты регрессии нормированной модели (рис. 1); численные значения коэффициентов регрессии нормированной модели равны частным производным $a_i = Y'_{X_i}$ нормированной функции отклика по соответствующим независимым переменным нормированной модели (4).

Таблица 2

Фрагмент массива исходных данных в размерном и нормированном виде

№	V	S	t	Шероховатость Ra , мкм	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1 * X_2$	$X_1 * X_3$	$X_2 * X_3$
1	50	0,08	0,50	2,09	1	-1	-1	-1	1	1	1
2	50	0,08	0,60	1,71	1	0	-1	-1	0	0	1
3	50	0,08	0,70	1,56	1	1	-1	-1	-1	-1	1
...											
26	120	0,16	0,60	1,86	1	0	1	1	0	0	1
27	120	0,16	0,70	1,65	1	1	1	1	1	1	1

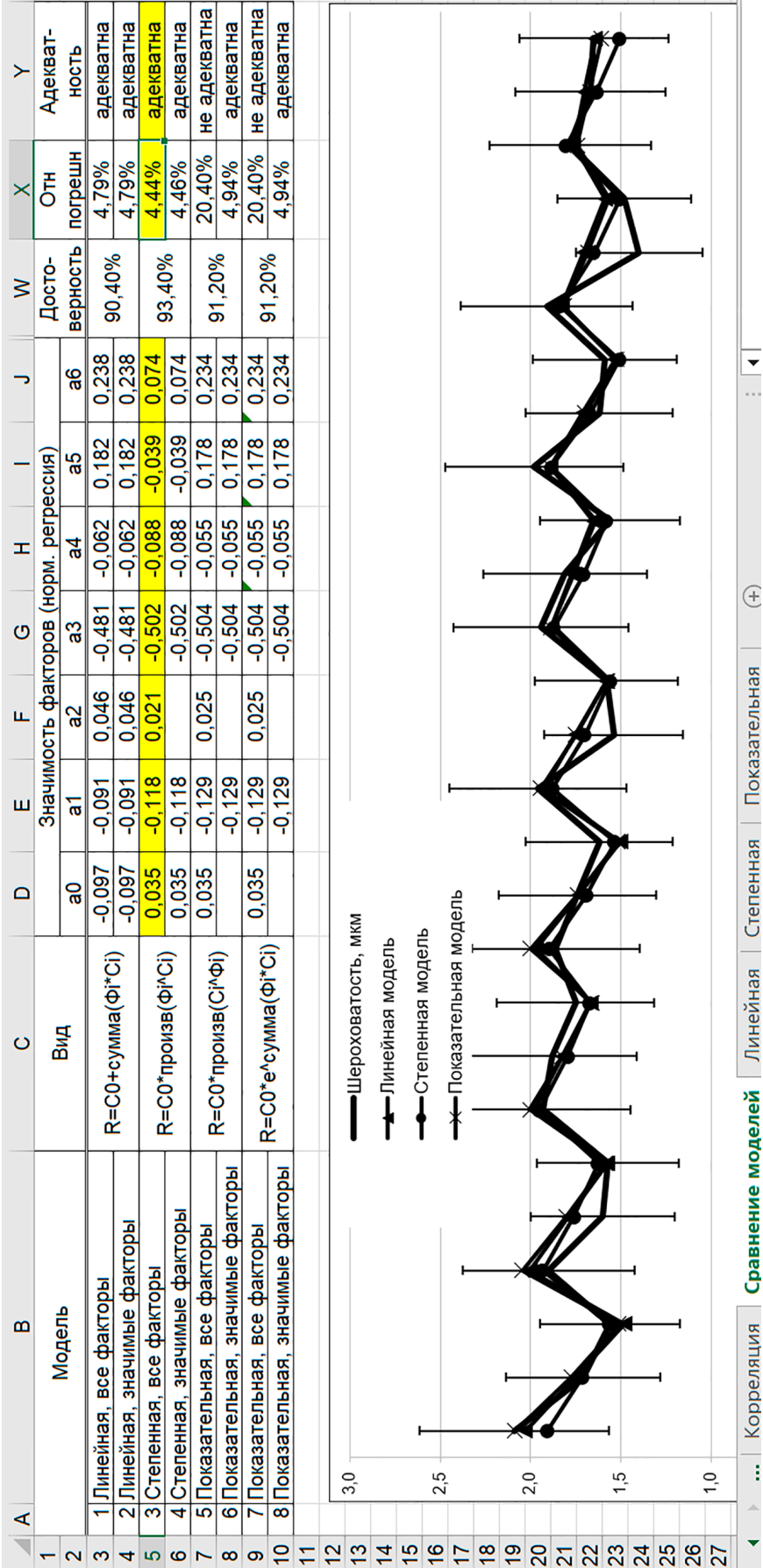


Рис. 1. Рабочий лист «Сравнение моделей»

№	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	И	Ј	К	Л	М	Н	О	Р	Q	R	S	T	U	V	W	X
1	параметр																						
2	миним		X1	X2	X3	X4	X5	X6	Функция отклика Y		Факторы реальные		R	Доверительная вер-ть	93,40%						93,40%		
3	максим		-1	-1	-1	-0,633	-0,519	-0,493	-1	45,00	Ф1	Ф2	Ф3	Табличный критерий	0,084								
4	максим		1	1	1	0,647	0,531	0,508	1	132,00				Студента	1,824								
5	средн		0,26	0,22	0,13	0,002	0,001	0,002	0,15	88,50				Табличный F-критерий	1,824								
6	1		-0,8042	-0,7642	-0,6077	0,6146	0,48871	0,46443	0,380	50,00	0,08	0,50	1,906	Расчетный F-критерий	1,828								
7									0,396	1,917					1,826								
12														0,04	-0,12	0,00	-0,50	-0,09	-0,04	0,07	норм_1		17,74%
13														0,11	0,35	0,06	1,50	0,26	0,12	0,22			4,44%
14		27	11,948	11,011	7,1149	4,87666	3,15103	2,90164					0,175	0,04	-0,12	0,02	-0,50	-0,09	-0,04	0,07	норм_0		средн
15	№	X0	X1	X2	X3	X4=X1*X2	X5=X1*X3	X6=X2*X3	Y	Ф1	Ф2	Ф3	R	y*X0	y*X1	y*X2	y*X3	y*X4	y*X5	y*X6	y*	модель_0	отн.погр. к
16	1	1	-0,8042	-0,7642	-0,6077	0,6146	0,48871	0,46443	0,6830	50,00	0,08	0,50	2,09	0,683	-0,549	-0,522	-0,415	0,420	0,334	0,317	0,380	1,9	8,71%
17	2	1	-0,8042	-0,7642	0,0712	0,6146	-0,05722	-0,05438	0,0156	50,00	0,08	0,60	1,71	0,016	-0,013	-0,012	0,001	0,010	-0,001	-0,001	0,022	1,7	0,20%
18	3	1	-0,8042	-0,7642	0,6451	0,6146	-0,5188	-0,49303	-0,2897	50,00	0,08	0,70	1,56	-0,290	0,233	0,221	-0,187	-0,178	0,150	0,143	-0,280	1,6	0,29%

Рис. 2. Рабочий лист «Степенная»

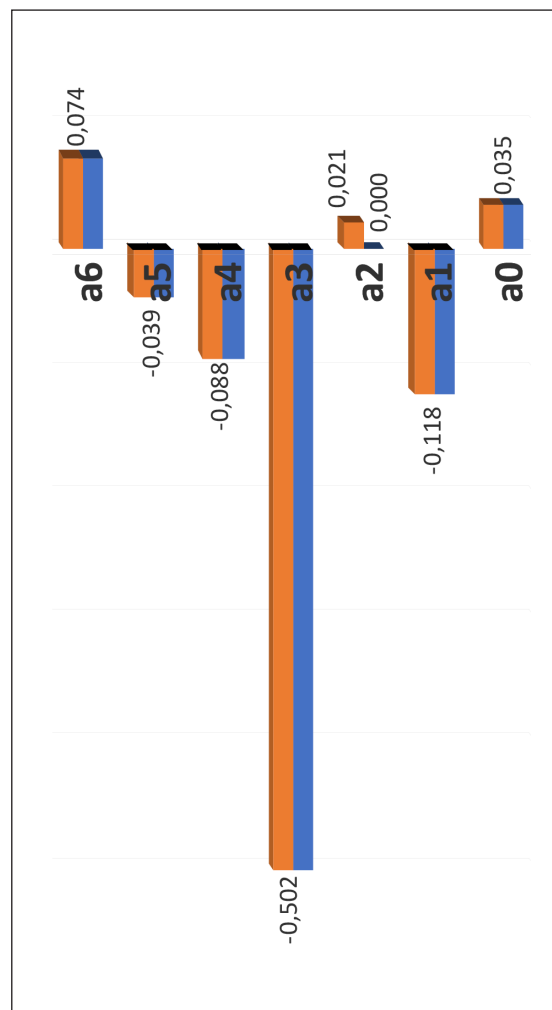


Рис. 3. Сравнение значимости технологических условий обработки

Поскольку все переменные нормированной модели имеют одинаковый численный масштаб и являются безразмерными математическими величинами, для независимых переменных допустима операция оценки сравнительной значимости соответствующих технологических факторов процесса на функцию отклика по величине коэффициентов регрессии нормированной модели.

Пример расчета коэффициентов a_i показан на рисунке 2.

Анализ данных, представленных на рисунках 1, 2, позволяет сделать следующие выводы. Средняя относительная погрешность показательной модели превышает аналогичные параметры линейной и степенной (12,67% – показательная; 4,79% – линейная; 4,45% – степенная). Максимальная относительная погрешность модели составляет около 17%, а средняя относительная погрешность – 4%.

В контексте обсуждаемой модели значимость фактора относится к его статистической значимости в пределах интервалов варьирования переменных исходной модели. Это означает, что факторы, которые были определены как значимые, оказывают влияние на результаты модели, в то время как незначимые факторы могут быть исключены из анализа без потери важной информации. Важность того или иного фактора оценивается путем определения коэффициентов регрессии. Они могут принимать положительные или отрицательные значения, указывая на направление их влияния. Гистограмма на рисунке 3 показывает значения коэффициентов регрессии $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ и a_6 для изучаемой линейной модели.

В электронной таблице для степенной модели на рисунке 2 представлены коэффициенты регрессии 0,04, –0,12, 0,02, –0,50, –0,09, –0,04 и 0,7. Эти коэффициенты используются для определения значимых факторов для модели. Они получены с достоверностью более 93%.

Из семи факторов три являются независимыми и соответствуют технологическим условиям обработки – эти три фактора учитывают взаимодействие технологических условий обработки. Один из независимых факторов (Φ_2) в результате оценки значимости с вероятностью не менее 93,4% (рис. 2) признан статистически не значимым, соответственно, коэффициент регрессии $a_2 = 0$.

Влияние фактора Φ_2 (скорость линейной подачи S) для условий чистовой обработки можно рассматривать как случайное. Объяснить подобное явление можно тем, что при чистовом точении глубина резания сравнима по величине с радиусом при вершине резца и удельное влияние пластического деформирования в зоне обработки сравнимо с влиянием собственно процесса стружкообразования. Фактически имеет место явно выраженное обкатывание обрабатываемой поверхности [8].

Построенная степенная модель (рис. 4) достоверна с вероятностью более 90%. Качественное сравнение коэффициентов регрессии переменных позволяет выделить два значимых технологических фактора: скорость резания V и глубина резания t . Глубина резания имеет гораздо большее влияние ($a_3 = -0,502$, рис. 3), чем скорость резания ($a_1 = -0,118$, рис. 3), что также объясняется явно выраженным процессом поверхностного пластического деформирования и развитым силовым механизмом формирования свойств обработанной поверхности.

Черная линия с «отсечками погрешности» – экспериментальные данные, на основе которых построены модели. На рис. 2 показаны коэффициенты регрессии нормированных моделей – определенные без проверки статистической значимости (строка 14) и статистически значимые (строка 12). Выделенное поле – ячейки K6:N7 – представляет «виртуальный калькулятор» для вычисления высоты микронеровностей, прогнозируемой при определенных условиях обработки.

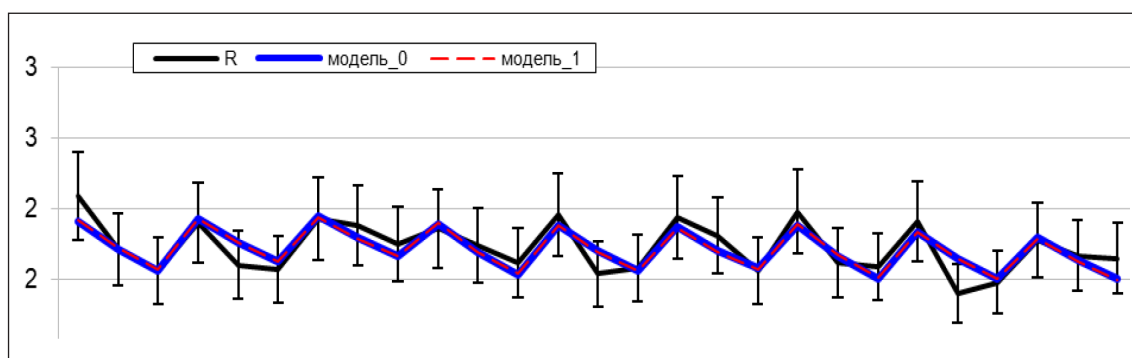


Рис. 4. Представление шероховатости поверхности для степенной модели

Заключение

С помощью статистического анализа выявлены два основных технологических фактора, определяющих формирование микропрофиля при чистовом точении углеродистой стали: скорость резания V и глубина резания t . Глубина резания оказывает значительное влияние на процесс резания. Поскольку глубина резания сопоставима с радиусом кривизны режущего инструмента, то при малых подачах и малых глубинах фактически не происходит резания. Вместо этого наблюдаются такие явления, как пластическое деформирование и трение. При увеличении глубины резания и скорости подачи (ширины и толщины срезаемого слоя) удельная доля процесса резания в совокупности механизмов формирования поверхностного слоя возрастает, влияние геометрии инструмента и температурных явлений на микропрофиль также увеличивается.

Вероятность корреляции между скоростью и шероховатостью составляет более 90%. Другими словами, чем выше скорость, тем ниже шероховатость. Глубина резания оказывает значительное влияние на шероховатость. При постоянной глубине резания шероховатость уменьшается, а коэффициент корреляции между этими двумя параметрами составляет 90%. Более глубокий срез может способствовать получению более чистой поверхности. Погрешность модели в среднем составляет 17%, что считается вполне приемлемым при прогнозировании сложных стохастических процессов. Вероятность того, что зависимость определена правильно, – более 90%.

Список литературы

1. Ингеманссон А.Р. Характеристика, состав, механизмы функционирования и современные аспекты внедрения цифровых производственных систем в машиностроение // *Научные технологии в машиностроении*. 2018. № 8 (86). С. 25-32. DOI: 10.30987/article_5b53640259b448.70821734.
2. Норенков И.П., Капустин Н.М., Васильев Г.Н. Автоматизация конструкторского и технологического проектирования. М.: Высшая школа, 1986. 191 с.
3. Чигиринский Ю.Л. Современное состояние и тенденции развития технологической подготовки машиностроительного производства // *Научные технологии в машиностроении*. 2020. № 8 (110). С. 29-35. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-8-29-35.
4. Kraynev D.V., Sergeev A.S., Tikhonova Z.S. Structuring control of facial layer during edge cutting machining // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 973. P. 51-55. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.973.51.
5. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
6. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
7. Суслов А.Г., Петрешин Д.И., Федонин О.Н., Ханджко В.А. Автоматизация управления параметрами качества поверхностного слоя и эксплуатационными свойствами деталей машин при обработке резанием // *Научные технологии в машиностроении*. 2019. № 8. С. 28-36. DOI: 10.30987/article_5d2635cb62fb56.07245294.
8. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение, 1992. 240 с.
9. Чигиринская Н.В., Чигиринский Ю.Л., Горобцов А.С. Моделирование неперiodических стохастических процессов: учеб. пособие. Волгоград: ВолГТУ, 2019. 108 с.
10. Чигиринский Ю.Л., Куанг Чонг Нго Влияние тепловых процессов на характеристики микропрофиля фрезерованной поверхности // *Известия ВолГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении*. Волгоград. 2016. № 5 (184). С. 48-51.
11. Чигиринская Н.В., Чигиринский Ю.Л., Горобцов А.С. Планирование эксперимента в задачах техники и экономики: учеб. пособие. Волгоград: ВолГТУ, 2015. 93 с.
12. Tchigirinsky Ju.L., Gribanova N., Gontar A.P., Chigirinskaya N.V. Multidimensional Model of Product Quality Formation, MATEC Web of Conferences. 2021. Vol. 346. 6 p. DOI: 10.1051/mateconf/202134601006.
13. Kraynev D.V., Frolov E.M., Norchenko P.A. Formation of the surface layer properties in edge cutting machining of stainless and heat-resistant steels // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 973 P. 56-60. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.973.56.
14. Кузнецова Е.М., Овсянников В.Е., Ковенский И.М., Некрасов Р.Ю. Особенности микрорельефа шероховатости при токарной обработке закаленных сталей // *Современные научные технологии*. 2023. № 8. С. 45-50. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39729> (дата обращения: 20.02.2025). DOI: 10.17513/snt.39729.
15. Chigirinskiy J.L., Nesterenko P.S., Smirnova E.N. Inspecting the quality of a surface layer in non-rigid shafts turning by adaptive control over the process of cutting, *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 973. P. 212-218. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.973.212.