
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 621.91.01

**ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ
ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ**© 2022 г. А. А. Ковалев^{1,*}, А. С. Краско¹, Н. В. Рогов¹¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*e-mail: kovalevarta@gmail.com

Поступила в редакцию 08.10.2021 г.

После доработки 17.05.2022 г.

Принята к публикации 21.06.2022 г.

В настоящей статье рассматриваются модели оценки шероховатости поверхностей деталей машин с износостойкими покрытиями при токарной обработке. Была предложена модель оценки шероховатости, позволяющая установить взаимосвязь между получаемой при токарной обработке величиной шероховатости поверхности газотермического покрытия с режимами резания, геометрическими параметрами реза и свойствами материалов заготовки и инструмента.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, износостойкие газотермические покрытия, труднообрабатываемые материалы, токарная обработка газотермических покрытий, режимы резания, геометрические параметры режущего инструмента

DOI: 10.31857/S023571192205008X

Обеспечение эксплуатационных свойств ответственных деталей машин и технологической оснастки, работающих в условиях многофакторных воздействий, в современном машиностроении реализуется, в частности, посредством нанесения функциональных покрытий, в том числе газотермическими методами [1–6].

На сегодняшний день наиболее перспективными способами газотермического напыления являются плазменное (APS) и высокоскоростное газопламенное (HVOF, HVAF) напыление, позволяющие в условиях мелкой серии заменить химико-термическую обработку и нанесение гальванических покрытий, что потенциально даст возможность повысить гибкость производства [2, 7–11].

Покрытия, полученные такими способами, обладают высокой износостойкостью, однако в процессе их формирования не обеспечивается заданная разменная точность и шероховатость поверхности детали, что приводит к необходимости их дальнейшей механической обработки.

Износостойкость покрытий, обусловленная их высокой твердостью и хрупкостью, вызывает трудности при последующей механической обработке, а наличие переходной зоны между покрытием и основным материалом является ограничением по назначению технологических режимов [12–17].

В настоящее время для обработки износостойких покрытий широко применяются методы абразивной обработки, однако для пар трения, вследствие шаржирования, требуется дополнительная ультразвуковая очистка поверхности. Помимо этого, в условиях мелкосерийного производства абразивные методы не обладают требуемой

гибкостью. Исходя из этого, наиболее рациональным методом обработки покрытий является лезвийная обработка – точение и фрезерование.

В связи с этим, актуальной задачей является оценка параметров качества поверхностей деталей с износостойкими покрытиями при токарной обработке с учетом труднообрабатываемости материалов и наличием переходной зоны между покрытием и основным материалом детали.

Разработка модели оценки шероховатости поверхности покрытия. В работах А.М. Дальского и А.Г. Сулова [18–20] изложены методики оценки шероховатости поверхности, полученной при обработке заготовок точением. Рассмотренная модель шероховатости учитывает составляющие профиля шероховатости, обусловленные: геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента; колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности; пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки; шероховатостью рабочих поверхностей инструмента.

На первом этапе рассматривается геометрически-кинематическая составляющая профиля шероховатости. Исходными данными являются следующие параметры: φ – главный угол резца в плане, град; φ_1 – вспомогательный угол в плане, град; S_o – подача инструмента, мм/об; r_e – радиус при вершине резца, мм.

При расчете составляющей шероховатости, обусловленной геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента, возможны четыре случая соотношений исходных данных между собой. При этом, сравниваются величины углов φ и φ_1 со значением $\arcsin(S_o/2r_e)$ и, исходя из этого, возможны следующие случаи: **1)** $\varphi > \arcsin(S_o/2r_e)$, $\varphi_1 > \arcsin(S_o/2r_e)$; **2)** $\varphi \leq \arcsin(S_o/2r_e)$, $\varphi_1 \leq \arcsin(S_o/2r_e)$; **3)** $\varphi > \arcsin(S_o/2r_e)$, $\varphi_1 \leq \arcsin(S_o/2r_e)$; **4)** $\varphi \leq \arcsin(S_o/2r_e)$, $\varphi_1 > \arcsin(S_o/2r_e)$.

Кинематическая составляющая профиля шероховатости поверхности при точении обусловлена геометрическими параметрами режущей пластины резца и величиной подачи инструмента [18]. Таким образом, под кинематической составляющей профиля понимается след, который оставляет инструмент на поверхности заготовки в процессе резания, перемещаясь вдоль ее оси.

Для оценки шероховатости используют соотношение (1) [19], определяющее высоту неровности Rz' , образованной при прохождении резца (рис. 1).

$$Rz' = \frac{125S_o^2}{r_e}. \quad (1)$$

При более высоких значениях подачи в процессе резания помимо главной режущей кромки и криволинейного участка режущей кромки резца участвует также вспомогательная режущая кромка. Таким образом, представленная на рис. 1 модель формирования шероховатости становится некорректной.

Очевидно, что профиль шероховатости при точении с участием вспомогательной режущей кромки будет формироваться из следов криволинейного участка режущей кромки и вспомогательной режущей кромки резца, что графически представлено на рис. 2.

Оценка шероховатости проводится на основании геометрических построений (рис. 2), согласно которым, кинематическая составляющая профиля шероховатости Rz определяется в соответствии с равенством

$$Rz = DC - CE.$$

Для удобства дальнейшей записи вводятся следующие параметры: ω – угол, определяемый из ΔO_1FC по формуле (2); ψ – угол, определяемый из ΔO_1FC в соответствии с теоремой синусов по формуле (3).

$$\omega = 90^\circ + \varphi_1. \quad (2)$$

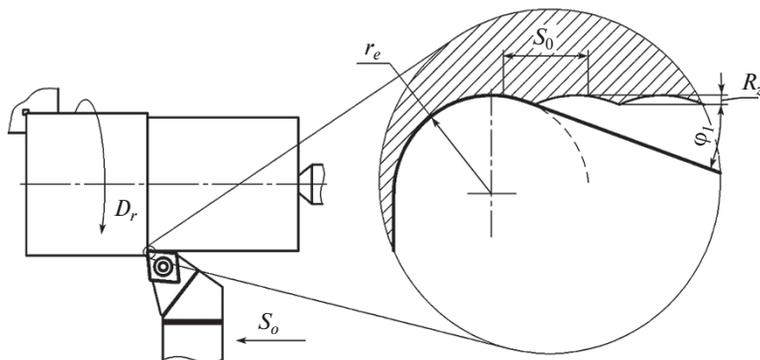


Рис. 1. Формирование кинематической составляющей шероховатости поверхностного слоя при малых подачах.

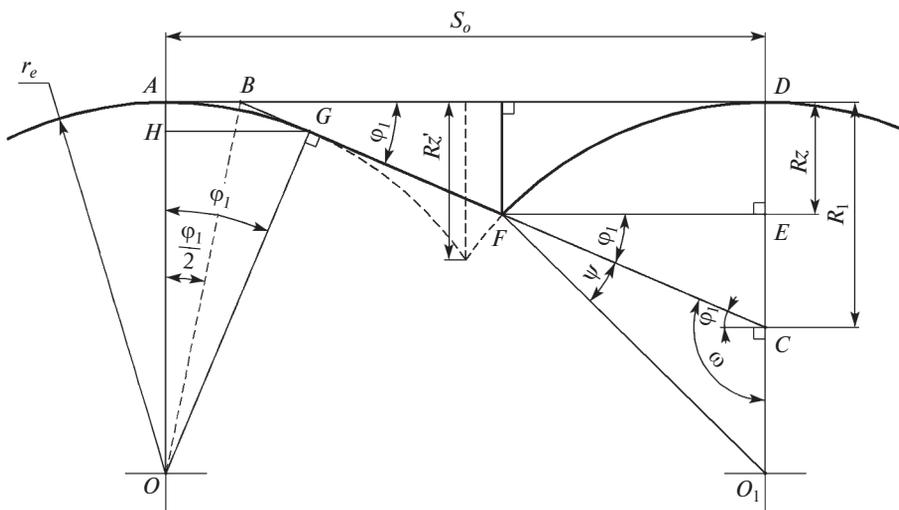


Рис. 2. Формирование кинематической составляющей шероховатости поверхностного слоя при высоких подачах.

$$\sin \psi = \frac{FO_1 \sin \omega}{CO_1} = \frac{r_e \sin \omega}{r_e - DC};$$

$$\psi = \arcsin \left(\frac{\sin \omega (r_e - DC)}{r_e} \right).$$
(3)

На основании геометрических построений (рис. 2) получено равенство (4)

$$R_1 = DC = \operatorname{tg} \varphi_1 \left(S_o - r_e \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_1}{2} \right) \right).$$
(4)

Окончательно, с учетом введенных соотношений, получена следующая система уравнений (5), по которой рассчитывается геометрически-кинематическая составляющая шероховатости поверхности:

$$Rz = \begin{cases} \frac{125S_o^2}{r_e}, & \text{если } S_o \leq 2r_e \sin \varphi_1, \\ R_1 - \sin \varphi_1 \sqrt{(r_e - R_1)^2 + r_e^2 - 2r_e (r_e - R_1) \cos(90^\circ - \varphi_1 - \psi)}, & \\ \text{если } 2r_e \sin \varphi_1 < S_o \leq \frac{2r_e}{\sin \varphi_1}. \end{cases} \quad (5)$$

При пересчете параметра Rz в параметр Ra принимается соотношение $Ra = 0.2Rz$ [19].

Составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, определяется способом, предложенным в [18], по формуле (6)

$$h_2 = \frac{P_z}{j}, \quad (6)$$

где P_z – сила резания, Н; j – жесткость технологической системы, кН/мм.

В источнике [18] для расчета силы резания предлагается использовать эмпирические зависимости, приведенные в [21]. Недостатком такого подхода является отсутствие справочных данных при обработке труднообрабатываемых материалов, например, титановых сплавов.

В настоящей статье, при определении составляющей профиля шероховатости h_2 используется аналитическая зависимость для расчета силы резания, приведенная в [22], которая позволяет получить данные для любых материалов с известными физическими свойствами.

Для расчета жесткости технологической системы используется зависимость, представленная в [23] (соотношение (7))

$$j = \frac{0.004EJ}{HL^2}, \quad (7)$$

где E – модуль упругости материала резцедержателя, МПа; J – момент инерции сечения резцедержателя, мм⁴; H – размер резцедержателя в плоскости yOz , мм; L – вылет реза, мм.

При оценке шероховатости в предлагаемой модели не учитывается пластическая деформация, т.к. она вносит несущественный вклад в общую величину шероховатости. Помимо этого, данное допущение справедливо при оценке шероховатости после токарной обработки материалов с низкой пластичностью, в частности, износостойких покрытий.

На основании полученных ранее зависимостей (5) и (6) разработана обобщенная модель оценки шероховатости Rz_0 (8), которая также учитывает величину шероховатости вершины резца (в соответствии с рекомендациями в [18–20])

$$Rz_0 = Rz + h_2 + Rz_1, \quad (8)$$

где Rz_1 – шероховатость поверхности вершины резца, мкм.

В процессе точения шероховатость вершины резца изменяется, поэтому в предлагаемой модели Rz_1 принимается равным среднему арифметическому значений шероховатости поверхности вершины резца до и после обработки.

Сравнительный анализ моделей оценки шероховатости поверхностей деталей с износостойкими покрытиями. Сравнение существующей модели [18–20] и предложенной в настоящей статье обобщенной модели оценки величины шероховатости в зависимости от параметров механической обработки точением проводится в программе Matlab с использованием генератора случайных чисел. В табл. 1 представлены диапазоны исходных данных, принятые для выполнения машинного эксперимента. Для оценки

Таблица 1. Исходные данные для машинного эксперимента

Коэффициент теплопроводности материала резца, λ_p , Вт/(м °С)	20–50
Главный угол резца в плане, φ , град	45–95
Вспомогательный угол резца в плане, φ_1 , град	10–40
Радиус при вершине резца, r , мм	0.05–0.80
Коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, λ , Вт/(м °С)	20–100
Объемная теплоемкость обрабатываемого материала, c_p , МДж/(м ³ °С)	2.5–5.0
Передний угол резца, γ , град.	–5–5
Коэффициент трения по напряжению текучести, μ	0.2–0.5
Коэффициент трения между стружкой и передней поверхностью резца, μ_1	
Коэффициент трения между обработанной поверхностью заготовки и задней поверхностью резца на длине контакта, μ_2	
Длина контакта задней поверхности резца и обработанной поверхности заготовки, l_3 , мм	0.1–0.3
Напряжение текучести обрабатываемого материала, σ_s , МПа	1100–1800
Задний угол резца, α , град.	–15–15
Температура плавления обрабатываемого материала, $t_{\text{плав}}$, °С	1300–1700
Модуль упругости материала резца, $E_p \times 10^5$, МПа	1.9–2.1
Размеры поперечного сечения резца	H_p , мм
	B_p , мм
Вылет резца, L_p , мм	30–60
Предел прочности обрабатываемого материала, σ_b , МПа	800–1000
Шероховатость поверхности вершины резца, Rz_1 , мкм	0.8–1.6
Скорость резания, v , м/мин	50–500
Подача резца, s , мм/об	0.05–0.50
Глубина резания, t , мм	0.05–1.50

возможных вариантов сочетаний “обрабатываемый материал—материал режущего инструмента” были использованы данные для обрабатываемых материалов в диапазоне от высоколегированных сталей (например, 20Х23Н18) до цветных металлов и сплавов (таких как, например, бронза БрАЖ9-4). Свойства материала режущего инструмента также были взяты в широком диапазоне — от инструментальных сталей (У8, У12 и др.) до твердых сплавов (таких как Т5К10, Т15К6 и др.).

Для большого числа машинных экспериментов целесообразно провести корреляционный анализ, согласно которому наибольшее влияние на величину шероховатости оказывают параметры φ_1 , r и s , причем увеличение величины вспомогательного угла в плане и подачи вызывает ухудшение шероховатости обрабатываемой поверхности, в то время как увеличение радиуса режущей кромки улучшает шероховатость.

Таким образом, предложенная в настоящей статье обобщенная модель (8) для оценки составляющей шероховатости, обусловленной геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента, имеет более рациональный вид, чем предложенная в источнике [19], т.к. в (8) в качестве исходных данных входят φ_1 , r и s , оказывающие наибольшее влияние на значение величины шероховатости. При этом в [18–20] к вышеуказанным параметрам добавляется также главный угол в плане, φ , который, как показал корреляционный анализ, слабо влияет на результирующее значение величины шероховатости [18–20].

Таблица 2. Диапазоны изменения независимых переменных, принятые в исследовании [24]

	v , м/мин	s , мм/об	t , мм
min	100	0.01	0.005
max	400	0.04	0.025

Сравнение моделей шероховатости поверхностей деталей с экспериментальными данными. Был проведен сравнительный анализ предложенной обобщенной модели (8) с экспериментальными данными, приведенными в работе [24], в которой исследовалось влияние режимов обработки титанового сплава Ti-6Al-4V точением на величину шероховатости с использованием резца с пластиной из твердого сплава и углами $\varphi = 90^\circ$, $\varphi_1 = 30^\circ$, $\gamma = 0^\circ$ и $\alpha = 15^\circ$. Данная работа была выбрана для верификации полученной зависимости, т.к. часто на основе твердых соединений титана формируют износостойкие покрытия, применяемые в различных областях машиностроения.

С целью упрощения графического представления результатов эксперимента [24] с использованием программы Matlab была проведена аппроксимация данных квадратичным полиномом. Независимыми переменными в полученном выражении (9) являются v (м/мин), s (мм/об) и t (мм), а зависимой – шероховатость Ra (мкм).

$$Ra = 0.28 - 0.0018v + 23.12s + 33.83t + 0.0000033v^2 - 64.64s^2 - 1295.45t^2 - 0.0017vs + 0.0125vt - 391.67st, \quad (9)$$

$$R^2 = 0.9803, \quad F = 264.90 > F_0 = 3.24,$$

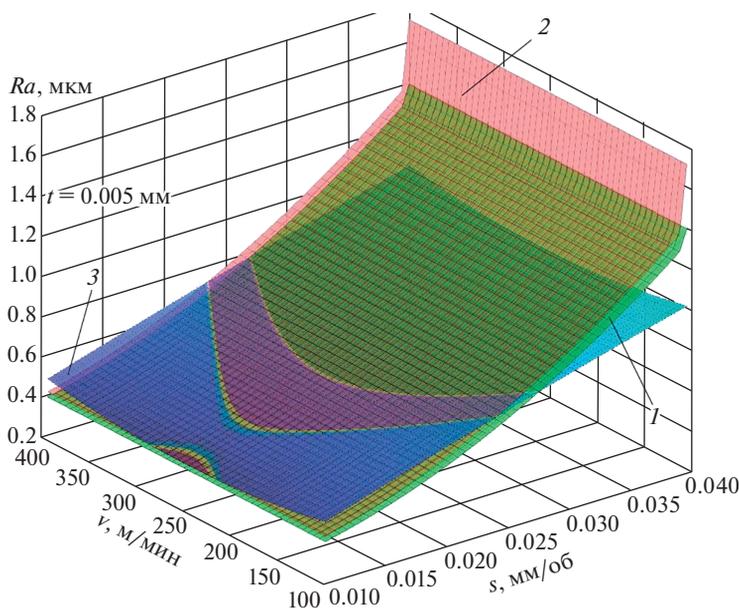


Рис. 3. Сравнение результатов при постоянной глубине резания $t = 0.005$ мм: 1 – разработанная модель; 2 – существующая зависимость [18–20]; 3 – экспериментальные данные.

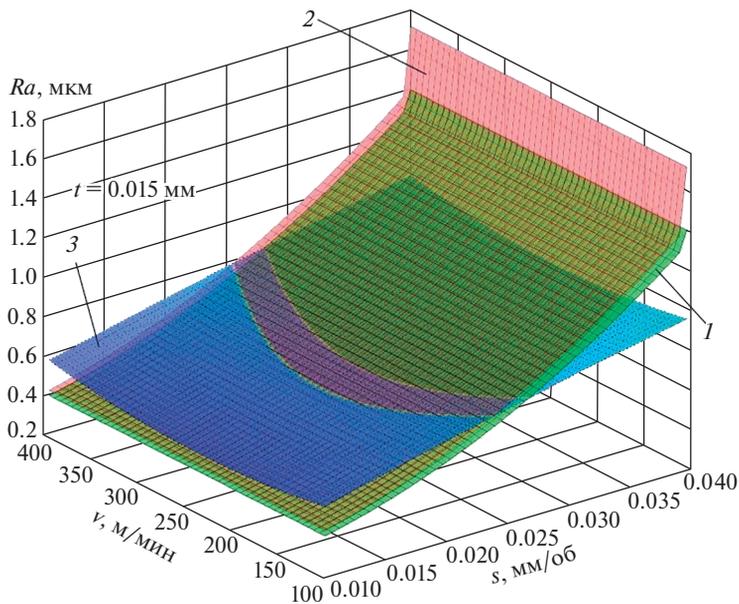


Рис. 4. Сравнение результатов при постоянной глубине резания $t = 0.015 \text{ мм}$: 1 – разработанная модель; 2 – существующая зависимость [18–20]; 3 – экспериментальные данные.

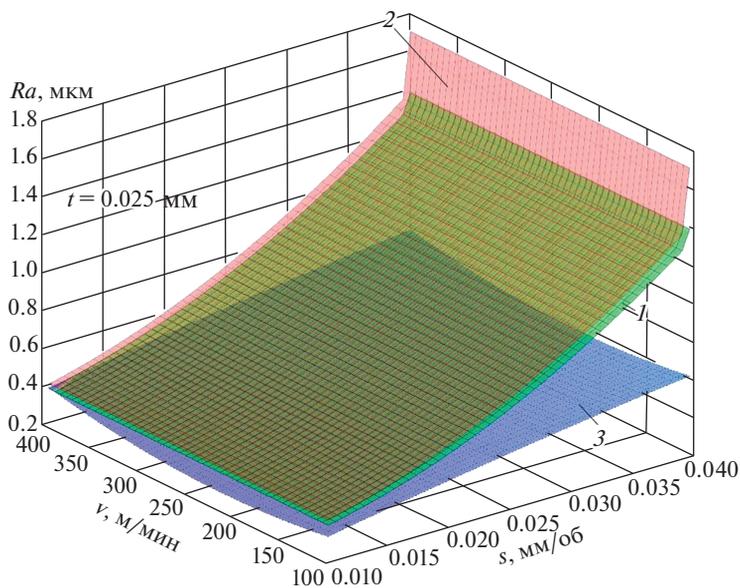


Рис. 5. Сравнение результатов при постоянной глубине резания $t = 0.025 \text{ мм}$: 1 – разработанная модель; 2 – существующая зависимость [18–20]; 3 – экспериментальные данные.

где R^2 – коэффициент детерминации принятой регрессионной модели; F – критерий Фишера принятой регрессионной модели; F_0 – критическое значение критерия Фишера с учетом числа наблюдений ($n = 20$) и числа независимых переменных ($m = 3$).

Средняя относительная погрешность значений, рассчитанных на основании регрессионного уравнения, составила 3.14%.

Диапазоны изменения режимов точения приведены в табл. 2.

На рис. 3–5 графически представлено сравнение результатов оценки шероховатости по зависимостям, предложенным в [18–20], разработанной обобщенной модели (8), а также эмпирической зависимости (9).

Обобщенная модель (8) и зависимость из [18–20] дают хорошую сходимость с экспериментальными данными из [24]. В предложенной обобщенной зависимости средняя погрешность результатов расчета шероховатости составила 17.81%, в зависимости из [18–20] – 22.28%, при этом среднее расхождение результатов расчета по ним составило 9.63%.

Выводы. Предложенная в настоящей статье обобщенная модель (8), используемая для оценки шероховатости поверхностей деталей с износостойкими покрытиями при токарной обработке, учитывает характеристики материала, влияющие на величину силы резания, которая, в свою очередь, оказывает влияние на величину шероховатости поверхностного слоя после точения, в то время как зависимость, предложенная в [18–20], основывается только на эмпирических данных силы резания, которые отсутствуют для современных материалов, в том числе, различных функциональных покрытий, используемых в машиностроении.

Машинный эксперимент по сравнению с существующей и вновь разработанной зависимостью показал, что в широком диапазоне исходных данных (табл. 1) результаты расчета существенно не различаются.

В обобщенной модели оценки шероховатости (8) не учитывается составляющая шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки, т.к. в процессе исследования зависимости из [18–20] было установлено, что она не оказывает существенного влияния на величину шероховатости, рассчитываемую по обобщенной модели. Как было отмечено ранее, это справедливо для хрупких материалов, к которым, в частности, относятся износостойкие покрытия.

Необходимо отметить, что предложенная модель не учитывает эксплуатационные характеристики системы деталь–покрытие, в частности, прочности сцепления, что требует дальнейших исследований в данном направлении.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев А.А., Краско А.С. Перспективы сокращения трудоемкости изготовления деталей машин за счет применения функциональных покрытий // Механика и машиностроение. Наука и практика. 2020. Т. 3. С. 27.
2. Ковалев А.А., Краско А.С. Перспективы и проблемы применения сверхзвукового плазменного напыления в условиях мелкосерийного производства // Современные материалы, техника и технология. 2020. С. 174.
3. Tokarev D.I., Drozdov A.A., Gulyaev M.N., Sirotenko L.D., Muratov K.R., Ablyaz T.R., Islamov V.F. Surface roughness in the machining of F-4K20 composite // Russian engineering research. 2019. V. 39. № 2. P. 167.
4. Philip Selvaraj D. Optimization of Surface Roughness of Duplex Stainless Steel in Dry Turning Operation Using Taguchi Technique // Materials Physics and Mechanics. 2018. V. 40. № 1. P. 63.

5. *Alajmi M.S., Almeshal A.M.* Prediction and Optimization of Surface Roughness in A Turning Process Using the ANFIS-QPSO Method // *Materials*. 2020. V. 13. № 13. P. 1.
6. *Nabil K., Zahia H., Yalles M.A., Ouelaa N.* Statistical analysis of surface roughness by design of experiments in hard turning // *Mechanika*. 2012. V. 18. № 5. P. 605.
7. *Албагачиев А.Ю., Ковалев А.А., Краско А.С.* Выбор метода упрочняющей обработки деталей машин в условиях автоматизированного мелкосерийного производства // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2021. № 2. С. 4.
8. *Макаров Р.В., Осколкова Е.Р.* Влияние вибраций на шероховатость поверхности при точении со смазочно-охлаждающими жидкостями // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2006. № 4–3 (28). С. 76.
9. *Ротаренко О.Ю., Любомудров С.А.* Исследование зависимости шероховатости поверхности от скорости резания при точении титановых сплавов // *Неделя науки СПбГПУ (материалы научно-практической конференции)*. 2014. С. 228.
10. *Некрасов В.Н., Черданцев А.О., Черданцев П.О.* Исследование процесса формирования шероховатости обработанной поверхности при точении // *Ползуновский вестник*. 2016. № 3. С. 71.
11. *Жуков Э.Л., Ларионова Т.А., Плавник С.Л.* Методы обеспечения заданной шероховатости обрабатываемой поверхности на операциях чистового точения // *Современное машиностроение. Наука и образование*. 2016. № 5. С. 924.
12. *Ярославцев В.М.* Обработка газотермических покрытий резанием: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 89 с.
13. *Саклакова А.Е., Селина Ю.Н., Симаков М.А., Филиппов Ю.А.* Экспериментальное исследование шероховатости поверхности детали из теплостойкой стали после точения режущими пластинами из твердого сплава // *Решетневские чтения*. 2016. Т. 1. С. 577.
14. *Сергеев А.С., Плотников А.Л., Зайцева Н.Г.* Уточненная математическая модель расчета параметра шероховатости поверхности при точении углеродистых сталей на станках с ЧПУ // *Металлообработка*. 2012. № 5–6 (71–72). С. 64.
15. *Вожжов А.А.* Оценка влияния относительных колебаний детали и инструмента на шероховатость поверхности в процессе фасонного точения канавок колец коллекторов // *Вестник современных технологий*, 2017. № 3 (7). С. 24.
16. *Рогов В.А., Горбани С.* Исследование рабочих параметров резцов для чистовой обработки // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 11–3. С. 435.
17. *Чигиринский Ю.Л., Ингеманссон А.Р., Юдкин А.Ю., Головков В.В.* Анализ влияния технологических условий точения на высоту микропрофиля обработанной поверхности // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2019. № 1 (224). С. 44.
18. *Суслов А.Г., Горленко О.А.* Экспериментально-статистический метод обеспечения качества поверхности деталей машин. М.: Машиностроение, 2003. 302 с.
19. *Суслов А.Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
20. *Суслов А.Г., Дальский А.М.* Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
21. *Справочник технолога-машиностроителя*. В 2 т. Т. 2 / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 818 с.
22. *Воронцов А.Л., Албагачиев А.Ю., Султан-заде Н.М.* Теоретические основы обработки металлов в машиностроении: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2014. 552 с.
23. *Безъязычный В.Ф.* Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2013. 568 с.
24. *Aslantas K., Danish M., Hasçelik A., Mia M., Gupta M., Ginta T., Ijaz H.* Investigations on Surface Roughness and ToolWear Characteristics in Micro-Turning of Ti-6Al-4V Alloy // *Materials*. 2020. V. 13. № 13. P. 1.