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

УДК 620.179.118

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ НОРМ ТОЧНОСТИ
ОТВЕТСТВЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ****© 2025 г. О. А. Леонов^{1, *}, Н. Ж. Шкаруба^{1, *},
Ю. Г. Вергазова^{1, *}, Д. У. Хасьянова²**¹ *Российский государственный аграрный университет —
МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва, Россия*² *Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия
* e-mail: metr@rgau-msha.ru*

Поступила в редакцию 06.09.2024 г.

После доработки 09.12.2024 г.

Принята к публикации 20.12.2024 г.

Предложены зависимости для расчета поправок на смятие шероховатостей поверхностей деталей. Представленные зависимости позволяют не только определить величины смятия шероховатости поверхности в момент формирования соединения, но и ограничить величины шероховатостей для формирования требуемой площади контакта. Учитывая, что для ответственных поверхностей деталей нормируется Ra , а для расчета величины смятия необходимо использовать Rz , уточнены зависимости для перевода Ra в Rz . Составлена сравнительная таблица, подтверждающая правильность проведенных расчетов в диапазоне $Ra = 0.1–2.5$ мкм. На примере расчета и выбора посадки с натягом показано, что *получаются разные посадки: $\text{Ø}30\text{H}8/\text{y}8$ – при допустимых значениях шероховатостей поверхности отверстия и вала, а при использовании установленных на чертеже – $\text{Ø}30\text{H}9/\text{z}9$.*

Ключевые слова: натяг, зазор, шероховатость поверхности, соединение, посадка, смятие шероховатости

DOI: 10.31857/S0235711925020053, **EDN:** DHNSME

Геометрические параметры деталей, образующих соединения, такие как отклонения формы и расположения поверхностей [1], натяги и зазоры в посадках [2, 3], а также шероховатость поверхностей сопрягаемых деталей, оказывают существенное влияние на параметры долговечности работы агрегатов.

При формировании посадок с натягом, чем больше вертикальные параметры шероховатости (Ra и Rz), тем менее качественным оказывается соединение, поскольку уменьшается фактическая площадь контакта, даже при идеальной геометрической форме элементов деталей [4].

При эксплуатации посадок с зазором большие поверхностные неровности быстро истираются, что приводит к быстрому увеличению начального конструктивного зазора. При истирании частицы материала не полностью удаляются из зоны контакта деталей и способствуют еще большему износу поверхностей. Поэтому для многих агрегатов, и в частности, для двигателей и коробок передач, устанавливают

ограничения по нагрузке в начальный период эксплуатации, который называют обкаткой, и требуют регулярной смены масла для того, чтобы удалить продукты износа из агрегата [5].

Поверхностные неровности оказывают серьезное влияние на усталостную прочность, износостойкость и срок службы механических изделий [6, 7]. Кроме этого, поверхностные неровности влияют на антикоррозийные свойства поверхности [8]. Чем больше поверхностные неровности, тем больше идет накопление во впадинах влаги и кислот, что способствует распространению коррозии [5].

На рис. 1а показано, как влияет шероховатость поверхности на износ — увеличение зазора в посадке. При более грубой шероховатости интенсивность изнашивания возрастает (кривая 1) [9, 10].

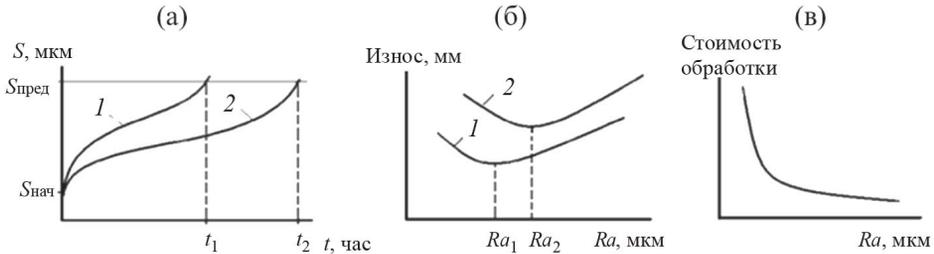


Рис. 1. Влияние шероховатости поверхности: (а) — на долговечность соединения при более грубой 1 и более чистой 2 поверхности; (б) — на изнашивание при легких (1) и тяжелых (2) условиях работы; (в) — на стоимость обработки элемента детали.

Из рис. 1б видно, что при более легких условиях эксплуатации (кривая 1) меньше износ детали и оптимальная величина шероховатости поверхности Ra_1 меньше, чем при более тяжелых условиях работы (кривая 2).

Чем меньше назначена величина шероховатости поверхности, тем дороже будет стоимость обработка (рис. 1в) [9].

Кроме Ra и Rz есть такой мощный параметр шероховатости поверхности, как относительная опорная длина профиля t_p , которая характеризует фактическую опорную площадь, и именно от этого параметра в большой степени зависит начальная износостойкость подвижных соединений, а также прочность пресовых посадок и размер пластической деформации поверхностей при контакте вала и отверстия в неподвижных соединениях (рис. 2) [10].

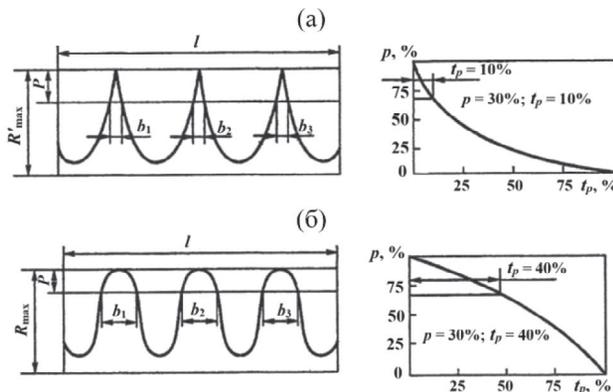


Рис. 2. Формирование относительной опорной длины профиля: (а) — при точении; (б) — при полировании.

Кроме шести количественных параметров, установленных стандартом [11], существует еще два качественных параметра: 1) *вид обработки*. Указывается в том случае, когда шероховатость поверхности следует получить только определенным способом; 2) *тип направления неровностей*. Указывается только в ответственных случаях, когда это необходимо по условиям работы детали или сопряжения. В зависимости от направления движения часто бывает целесообразным, чтобы неровности имели направление, совпадающее с направлением движения.

На практике параметр шероховатости Ra используют чаще, чем параметр Rz , т.к. считается, что он более информативен, рекомендован стандартами на шероховатость как предпочтительный, а также по причине возможности применения приборов не содержащих цифровых схем, т.к. достаточно легко получить и интегрировать абсолютное значение сигнала с помощью аналоговой электроники. Другие параметры на практике применяются реже, в основном при определенных эксплуатационных условиях и специальных требованиях к поверхности. Параметр Rz применяется если поверхность малая по размерам, а также при нормировании поверхностных неровностей в диапазоне 0.025–0.1 мкм и в диапазоне от 10–1600 мкм. Если возникает необходимость перехода от одного параметра к другому широко используют следующие соотношения: $Ra \approx 0.25Rz$ если $Rz \geq 8$ мкм, $Ra \approx 0.2Rz$ если $Rz < 8$ мкм.

Обобщая, можно сделать вывод, что назначение шероховатости поверхности для ответственных соединений — это сложная техническая и экономическая задача, от правильного решения которой зависит долговечность работы соединений.

В настоящее время ученые продолжают исследования образующейся шероховатости поверхности в процессе механической обработки [12–16], особое внимание уделяется исследованию зависимостей подачи и глубины резания на шероховатость обрабатываемых деталей [17–19], а также исследуют процессы влияния шероховатости поверхности на эксплуатационные свойства изделий [20–23]. Еще одно важнейшее направление исследований — оптимизация шероховатости поверхности в производственных процессах различными методами [24–29].

Результаты исследований и их анализ. Схема смятия шероховатостей поверхностей и формирования площади контакта после запрессовки вала в отверстие и после нагрева отверстия представлена на рис. 3.



Рис. 3. Смятие шероховатости отверстия и вала в процессе образования соединения с натягом.

Поправку на смятие шероховатости поверхности в процессе формирования соединения при ремонте машин ввел в свое время профессор А. И. Иванов на основании проведенных практических экспериментов во время анализа изнашивания ответственных соединений агрегатов отечественных тракторов с целью прогнозирования сроков их ремонта и замены деталей [30]

$$N_R = 0.25\eta T_K K, \quad (1)$$

где η — коэффициент уменьшения шероховатости поверхности; T_K — конструктивный допуск посадки; K — коэффициент качества точности.

Более подробно смятие поверхностей при формировании соединения с натягом рассмотрено Е. Ф. Бежелуковой в работе [4]. Она доказала, что на величину и характер смятия неровностей оказывают влияние как основные параметры шероховатости поверхности каждой из соединяемых деталей, так и условия формирования соединения. Причем неровности поверхностей вала и отверстия, изготовленных из разных материалов, сминаются на разную величину. Поэтому для расчета компенсации смятия неровностей целесообразно использовать зависимость [4]

$$N_R = 2(k_A i_A Ra_A + k_B i_B Ra_B), \quad (2)$$

где Ra_A, Ra_B — средние арифметические отклонения профилей поверхностей отверстия и вала; i_A и i_B — коэффициенты перехода от Ra к Rz ;

$$\begin{cases} i_A = \frac{Rz_A}{Ra_A} = 10^{0.79 - \lg m_A - 0.021 \lg Ra_A}, \\ i_B = \frac{Rz_B}{Ra_B} = 10^{0.79 - \lg m_B - 0.021 \lg Ra_B}. \end{cases} \quad (3)$$

где $m = 1.25$ для нерегулярной шероховатости, $m = 1.15$ для регулярной шероховатости; k_A и k_B — коэффициенты смятия неровностей поверхностей отверстия и вала;

$$k_A = \frac{\Delta Ra_A}{Ra_A}; \quad k_B = \frac{\Delta Ra_B}{Ra_B}, \quad (4)$$

где ΔRa_A и ΔRa_B — разности высот неровностей поверхностей отверстия и вала до формирования соединения и после выпрессовки (находят экспериментально).

Таким образом, обобщая накопленный опыт, можно выделить версию формул для расчета поправки на смятие шероховатостей поверхностей с целью расчета посадок в следующих двух видах:

— при заранее неизвестной шероховатости поверхности

$$\Delta N_R \leq 2k_R \eta T_N K_\Phi K_K, \quad (5)$$

— или, если параметры шероховатости известны,

$$\Delta N_R \leq 2k_R (Ra_d \eta_d + Ra_D \eta_D), \quad (6)$$

где k_R — коэффициент перехода от параметра Ra в Rz ; η — общий коэффициент смятия шероховатостей поверхностей деталей, или отдельно вала η_d и отверстия η_D ; $T_N = N_{Pmax} - N_{Pmin}$ — расчетный допуск посадки; K_Φ и K_K — коэффициенты, в которых учтено отклонение формы и возможный квалитет; Ra_D, Ra_d — параметры шероховатости втулки и вала.

После анализа массива данных о шероховатости поверхности выявлено, что параметры Ra и Rz жестко коррелированы между собой с коэффициентом корреляции $\rho \approx 0.98$, а и эмпирическое выражение для величин Ra и Rz в диапазоне $Ra = 0.05 - 10.0$ мкм, следующее:

$$Rz = ARa^{0.98}, \quad (7)$$

$$Ra = BRz^{1.02}, \quad (8)$$

где коэффициенты $A = 5.36$, $B = 0.18$ — для регулярной и $A = 4.93$, $B = 0.20$ для нерегулярной шероховатости.

Конструктор обычно назначает шероховатость поверхности ответственных соединений в виде Ra , а при расчете величины смятия надо учитывать высоту неровностей Rz , поэтому необходимо использовать зависимость (7), где вместо степени 0.98 фактически можно использовать значение 1.0, а коэффициент k_R перевода параметра Ra в Rz можно принять равным $k_R = (5.36 + 4.93)/2 = 5.15$, т.к. шероховатость

обработанной поверхности в большинстве случаев имеет регулярный профиль с нерегулярными проявлениями. Тогда справедливо выражение

$$Rz = 5.15Ra. \quad (9)$$

Также вышеописанное упрощение обосновывается тем, что полученные расчетные значения необходимо округлять до стандартных величин. Приведем пример расчета и округления в используемом диапазоне параметров шероховатостей поверхностей (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение расчетных и нормируемых величин шероховатости поверхности

Исходное значение Ra по ГОСТ Р 70117–2022	Расчетное значение Rz		Стандартное значение Rz	
	По формуле (7)	По формуле (9)	Для расчета по (7)	Для расчета по (9)
0.1	0.56	0.52	0.5	0.5
0.16	0.89	0.82	0.8	0.8
0.2	1.05	1.03	1.0	1.0
0.25	1.38	1.29	1.25	1.25
0.32	1.75	1.65	1.6	1.6
0.4	2.18	2.06	2.0	2.0
0.5	2.72	2.57	2.5	2.5
0.63	3.41	3.24	3.2	3.2
0.8	4.31	4.12	4.0	4.0
1.0	5.36	5.15	5.0	5.0
1.25	6.67	6.44	6.3	6.3
1.6	8.50	8.24	8.0	8.0
2.0	10.57	10.30	10.0	10.0
2.5	13.16	12.87	12.5	12.5

Из данных табл. 1 видно, что предлагаемая формула (8) в рабочем диапазоне значений шероховатостей приносит более точные результаты, а округление до стандартного значения — одинаково.

Увеличение параметров, характеризующих шероховатость поверхностей, ведет к уменьшению реальной площади контакта и дестабилизации параметров посадки [4], поэтому необходим ввод ограничения значения самих величин шероховатостей поверхностей отверстия и вала и, как следствие, поправки на смятие шероховатости:

$$\Delta N_{Rlim} \leq 2k_R \eta (Rad_{lim} + Ra_{Dlim}), \quad (10)$$

где Rad_{lim} и Ra_{Dlim} — предельно допустимые величины шероховатостей поверхностей вала и отверстия (для интервала размеров — от 18–120 мм: при запрессовке $Ra_d \leq 1.25$ мкм и $Ra_D \leq 2.5$ мкм; при температурной деформации деталей при сборке эти значения можно увеличить в два раза).

Приведем пример расчета шероховатости поверхности для коленчатых валов ДВС. Известно, что допуск на обработку шеек коленчатых валов составляет 15–20 мкм, а требования к шероховатости поверхности следующие: $Ra = 0.32$ – 0.16 мкм. По зависимости (1) при условии, что допуск формы для особо ответственного соединения составляет 40% от допуска размера, получим $Ra = 17.5 \cdot 0.09 \cdot 0.25 = 0.4$ мкм.

Данное значение вполне соответствует требованиям, тем более что по результатам анализа шероховатости поверхности коренных и шатунных шеек коленчатых

валов выявлено, что установившаяся шероховатость поверхности в результате длительной эксплуатации находится в пределах $Ra = 0.63\text{--}0.8$ мкм [5]. Получается следующий вывод — может быть и не надо для шеек коленчатых валов достигать требуемой по нормативной документации $Ra = 0.32\text{--}0.16$ мкм, а применять более дешевые средства и методы обработки для формирования $Ra = 0.4$ мкм.

Рассмотрим пример расчета посадок с учетом поправки на смятие шероховатости поверхности соединений с натягом соединения посадки полумуфты на вал редуктора Н 090.20, устанавливаемого на отечественные картофелеуборочные комбайны (табл. 2).

Таблица 2. Исходные данные и результаты расчета посадок цилиндрического соединения выходного вала редукторов Н 090.20 с полумуфтой

№	Параметр	Значение для соединения
1	Диаметр соединения d_n , м	0.03
2	Наименьший расчетный натяг $N_{P_{\min(l)}}$, мкм	20.63
3	Наибольший расчетный натяг $N_{P_{\max}}$, мкм	120.73
4	Шероховатость поверхности вала Ra_d , мкм	2.5 (1.25) ¹
5	Шероховатость поверхности втулки Ra_D , мкм	3.2 (2.5) ¹
6	Поправка на смятие шероховатости ΔN_R , мкм	17.1
7	Допустимое значение поправки на смятие шероховатости $[\Delta N_R]$, мкм	11.25
8	Наибольший технологический натяг $N_{T_{\max}}$, мкм	124.74 (130.59) ²
9	Наименьший технологический натяг $N_{T_{\min(l)}}$, мкм	36.88 (42.73) ²
10	Допуск посадки $T_{(l)}$, мкм	87.86
11	Стандартная посадка для допустимых значений шероховатостей	$\text{O}30\text{H}8/\text{y}8$
12	Стандартная посадка для реальных значений шероховатостей	$\text{O}30\text{H}9/\text{z}9$

¹ — в скобках указаны рекомендуемые значения.

² — в скобках указаны значения в случае применения реальных величин шероховатости поверхности.

При анализе параметров шероховатости поверхности деталей обнаружено, что нормированная чертежом шероховатость поверхностей полумуфты в виде $Ra = 3.2$ мкм и вала $Ra = 2.5$ мкм превосходит допустимые значения для обеспечения качественного формирования посадки с натягом, что указано в 4-й и 5-й строке табл. 2. В результате расчетов получаются и разные посадки — $\text{O}30\text{H}8/\text{y}8$ при допустимых значениях шероховатостей поверхности отверстия и вала, и $\text{O}30\text{H}9/\text{z}9$ — при установленных на чертеже. Какая из них прослужит дольше — это вопрос испытаний данных посадок на реальном объекте, но более грубая обработка, как указывалось ранее, приводит к уменьшению реальной площади контакта и вероятной дестабилизации параметров посадки. Это косвенно отражено на рис. 4 при сравнении диапазона допусков посадок.

При разбросе натягов 36–140 мкм и снижении фактической площади контакта, при малых натягах 36–50 мкм возможно проворачивание соединения, т.к. натяги для посадки $\text{O}30\text{H}9/\text{z}9$ были рассчитаны исходя из идеальных условий — полного цилиндра площадью pdl . А учитывая тот факт, что в расчетной зависимости для определения необходимого давления площадь стоит в знаменателе, то для меньшей площади требуется больший натяг для передачи заданного крутящего момента.

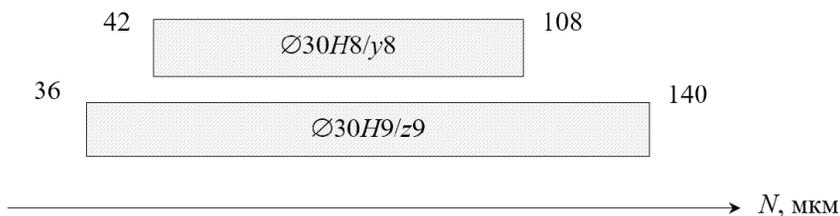


Рис. 4. Диапазон натягов в посадках $\text{Ø}30H8/y8$ и $\text{Ø}30H9/z9$.

Вывод. При проектировании соединений с натягом следует особое внимание уделять вопросам нормирования шероховатости поверхности каждой из соединяемых деталей, поскольку при увеличении шероховатости уменьшается фактическая площадь контакта даже при идеальной геометрической форме элементов деталей и соединение будет нестабильным.

На основе трудов А. И. Иванова и Е. Ф. Бежелуковой, предложены зависимости для расчета поправок на смятие шероховатостей поверхностей деталей. Представленные зависимости позволяют не только определить величины смятия шероховатости поверхности в момент формирования соединения, но и ограничить величины шероховатостей для формирования требуемой площади контакта. Учитывая, что для ответственных поверхностей деталей нормируется среднеарифметическое отклонение профиля Ra , а для расчета величины смятия необходимо использовать высоту неровностей по десяти точкам Rz , предложены зависимости для перевода Ra в Rz . Проведены расчеты и составлена сравнительная таблица, подтверждающая правильность полученных зависимостей. На примере расчета и выбора посадки с натягом посадок цилиндрического соединения выходного вала редукторов Н 090.20 с полумуфтой показано, что получаются разные посадки. При выполнении условия не превышения допустимых значений шероховатостей поверхности отверстия и вала — $\text{Ø}30H8/y8$, а при использовании установленных на чертеже — $\text{Ø}30H9/z9$, что отражается на долговечности работы соединения.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Российского государственного аграрного университета — МСХА им. К. А. Тимирязева. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Erokhin M. N., Leonov O. A., Shkaruba N. Zh. et al. Application of Dimensional Analysis for Calculating the Total Misalignment between a Seal and a Shaft // J. of Mach. Manuf. and Reliab. 2021. V. 50 (6). P. 524. <https://doi.org/10.3103/S1052618821060066>
2. Leonov O. A., Shkaruba N. Zh., Vergazova Yu. G. et al. Justification of Keyed Joint Fits // J. of Mach. Manuf. and Reliab. 2022. V. 51 (6). P. 548. <https://doi.org/10.3103/S1052618822060073>
3. Leonov O. A., Shkaruba N. Zh., Temasova G. N. et al. Calculation of Fit Tolerance with Clearance to Increase Relative Wear Resistance of Joints // J. of Friction and Wear. 2023. V. 44 (3). P. 171. <https://doi.org/10.3103/S1068366623030054>
4. Якушев А. И., Бежелукова Е. Ф., Плуталов В. Н. Допуски и посадки ЕСДП СЭВ для гладких цилиндрических деталей (расчет и выбор). М.: Издательство стандартов, 1978. 255 с.
5. Черноиванов В. И., Лялякин В. П. Организация и технология восстановления деталей машин. М.: ГОСНИТИ, 2016.

6. *Chand M., Kumar S., Jagota V., Kumar K.* Effect of Machining Parameters on the Surface Roughness of Hot Die Steel // *J. of Mater. and Engin.* 2024. V. 2 (2). P. 250.
<https://doi.org/10.61552/JME.2024.04.002>
7. *Ayanam S., Ihom P., Idorenyin A. Emmanuel* Effect of Machining Parameters on the Surface Roughness of Medium Carbon Steel Using Lathe Machine // *Eur. J. of Theor. and Applied Sci.* 2024. V. 2 (4). P. 798.
<https://doi.org/10.59324/ejtas>
8. *Безъязычный В. Ф., Клейменов В. В., Плешкун В. В.* К вопросу расчетного определения степени коррозионного влияния в процессе эксплуатации на шероховатость обработанной поверхности // *Вестник РГАТА им. П. А. Соловьева.* 2023. № 2 (65). С. 115.
9. *Курчаткин В. В., Тельнов Н. Ф., Ачкасов К. А. и др.* Надежность и ремонт машин: учеб. для студентов вузов по агроинженер. специальностям. М.: Колос, 2000. 775 с.
10. *Серый И. С.* Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1987. 367 с.
11. ГОСТ Р 2.309-20XX. Проект стандарта.
https://tk482.ru/sites/default/files/downloads/1.0.482-1.069.23_pnst_2.309_site.pdf
12. *Ковалев А. А., Краско А. С., Рогов Н. В.* Оценка шероховатости поверхностей деталей машин с износостойкими газотермическими покрытиями при токарной обработке // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* 2022. № 6. С. 56.
<https://doi.org/10.31857/S023571192205008X>
13. *Гафаров А. М., Шарифов З. З., Алиев Ч. М. и др.* Исследование шероховатости поверхностей деталей, обработанных асимметрично-безотрывочной притиркой // *Вестник машиностроения.* 2018. № 2. С. 77.
14. *Гвинджилия В. Е., Фоминов Е. В., Моисеев Д. В. и др.* Влияние динамических характеристик процесса резания на шероховатость поверхности детали при токарной обработке // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).* 2024. Т. 26. № 2. С. 143.
<https://doi.org/10.17212/1994-6309-2024-26.2-143-157>
15. *Васильев В. Б., Сосницкая Т. С., Корольков Ю. В. и др.* Расчет установившейся шероховатости и глубины упрочненного слоя при вибрационной отделочно-упрочняющей обработке с высокими амплитудами // *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2022. Т. 18. № 3 (207). С. 116.
<https://doi.org/10.36652/1813-1336-2022-18-3-116-118>
16. *Джанахмедов А. Х.* Анализ фрактальной структуры шероховатых поверхностей трения для установления переходных режимов фрикционного контакта // *Трение и износ.* 2023. Т. 44. № 6. С. 582.
<https://doi.org/10.32864/0202-4977-2023-44-6-582-590>
17. *Безъязычный В. Ф., Михеева А. В., Савченко М. И.* Влияние глубины резания на шероховатость обработанной поверхности // *Вестник РГАТА им. П. А. Соловьева.* 2022. № 1 (60). С. 87.
18. *Yuan Zh., Jiang Zh., Zhou Zh. et al.* Effect of surface roughness on friction and wear behavior of GCr15 bearing steel under different loads // *Surface Science and Technology.* 2024. V. 2. P. 28.
<https://doi.org/10.1007/s44251-024-00057-2>
19. *Guleria V., Kumar V., Singh Pr.* Surface roughness estimation using vibration characteristics extracted by variational mode decomposition in turning // *Engineering Research Express.* 2024. V. 202 (2). P. 11812.
<https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad476f>
20. *Жданов А. А., Фролов Е. М., Рогачев А. В. и др.* Оценка влияния смазочно-охлаждающих технических сред на стойкость и шероховатость поверхности при продольном точении // *Известия Волгоградского государственного технического университета.* 2024. № 8 (291). С. 13.
<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2024-8-291-13-18>
21. *Цветков Ю. Н., Горбаченко Е. О., Кудрявцева Е. П.* Прогнозирование кавитационной износостойкости металлических материалов по результатам измерения шероховатости изношенной поверхности // *Вестник машиностроения.* 2021. № 10. С. 22.
<https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-10-22-29>

22. *Аскеров С. А.* Модель зарождения трещины в барабане тормозного механизма // Трение и износ. 2020. Т. 41. № 5. С. 625.
<https://doi.org/10.32864/0202-4977-2020-41-5-625-634>
23. *Guo M., Wei Sh., Han Ch. et al.* Prediction of surface roughness using deep learning and data augmentation // J. of Intelligent Manufacturing and Special Equipment. 2024. V. 5. P. 1.
<https://doi.org/10.1108/JIMSE-10-2023-0010>
24. *Sukkam Ch., Chajit S.* A Surface Roughness Prediction Model for SKT4 Steel Milling Engineering // Technology & Applied Science Research. 2024. V. 14 (4). P. 15499.
<https://doi.org/10.48084/etasr.7612>
25. *Zhang Zh., Jia L., Luo M. et al.* A data-driven method for prediction of surface roughness with consideration of milling tool wear // The Int. J. of Advanced Manuf. Technol. 2024. V. 134 (9–10). P. 4271.
<https://doi.org/10.1007/s00170-024-14381-2>
26. *Zhang Z., Lv X., Qi B. et al.* Surface roughness prediction and roughness reliability evaluation of CNC milling based on surface topography simulation // Eksploatacja i Niezawodność — Maintenance and Reliability. 2024. V. 26. P. 2.
<https://doi.org/10.17531/ein/183558>
27. *Максаров В. В., Попов М. А., Болобов В. И. и др.* Исследование влияния радиуса скругления режущей кромки на шероховатость поверхности деталей // Металлообработка. 2023. № 2 (134). С. 8.
<https://doi.org/10.25960/mo.2023.2.8>
28. *Akash V., Dhas J., Lewise K. et al.* Surface Roughness Prediction using Swarm Fuzzy SVR Technique // J. of Physics: Conf. Series. 2024. V. 2837 (1). P. 01208.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2837/1/012082>
29. *Raju R. S., Kumar K., Vargish K. et al.* Machine learning based surface roughness assessment via CNC spindle bearing vibration // Int. J. on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2024. P. 2.
<https://doi.org/10.1007/s12008-024-01963-3>
30. *Иванов А. И.* Повышение эффективности ремонта и эксплуатации сельскохозяйственных машин (путем оптимизации размерных параметров): Дис. ... докт. техн. наук. М.: Моск. ин-т инженеров с.-х. производства им. В. П. Горячкина, 1973.