УДК 621.7.075

Экспериментальное исследование влияния конструктивных параметров накатного инструмента на качество поверхности зубьев

О.С. Витренко[1], О.В. Шарков[2]

[1] ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
[2] ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»

Experimental study of the effect of design parameters of a rolling tool on the quality of the tooth surface

O.S. Vitrenko[1], O.V. Sharkov[2]

[1] Kaliningrad State Technical University
[2] Immanuel Kant Baltic Federal University

Шероховатость определяет качество поверхностного слоя рабочих поверхностей зубьев и является важным параметром, влияющим на такие эксплуатационные характеристики зубчатых передач, как износостойкость, несущая способность, жесткость и теплостойкость. В связи с этим необходимо иметь возможность оценить параметр шероховатости на этапе выбора формообразующего инструмента для изготовления зубьев. Приведены результаты экспериментального исследования влияния конструктивных параметров накатного инструмента с гиперболоидной производящей поверхностью на параметр шероховатости рабочих поверхностей эвольвентных зубьев. Планирование эксперимента выполнено на основе центрального композиционного униформ-рототабельного плана второго порядка. В качестве исследуемого параметра выступала шероховатость рабочей поверхности изготавливаемых накаткой зубьев, а в качестве независимых — количество, угол наклона и делительный диаметр витков в наименьшем сечении гиперболоидного накатника. Получена эмпирическая модель для оценки параметра шероховатости профилей эвольвентных зубьев в зависимости от конструктивных параметров гиперболоидного накатника. Установлено, что зависимость шероховатости профилей зубьев от конструктивных параметров гиперболодного накатника является нелинейной и определяется их комбинацией. Применение гиперболоидных накатников обеспечило шероховатость профиля эвольвентных зубьев, соответствующую степени точности 5–7.

EDN: OXXSXV, https://elibrary/oxxsxv

Ключевые слова: гиперболоидный накатник, формообразование зубьев, планирование эксперимента, поверхностный слой, параметр шероховатости

Roughness determines the quality of the surface layer of the working surfaces of the teeth and is an important parameter affecting such operational characteristics of gears as wear resistance, load-bearing capacity, rigidity, heat resistance, etc. In this regard, it is necessary to have the ability to assess the magnitude of roughness at the stage of selecting a forming tool for making teeth. The paper presents the results of an experimental study of the effect of the design parameters of a rolling tool with a hyperboloid generating surface on the roughness of the working surfaces of involute teeth. The experiment was planned

using a second-order compositional uniform-rotatable plan. The roughness of the working surface of the teeth produced by knurling was taken as the studied parameter, and the independent parameters were the number, angle of inclination, and pitch diameter of the turns in the smallest section of the hyperboloid knurling tool. An empirical model has been obtained for estimating the obtained roughness value of involute tooth profiles depending on the design parameters of hyperboloid knurling tools. It has been established that, depending on the choice and combination of design parameters of hyperbolic knurling tools, the resulting roughness of tooth profiles is complex and nonlinear. The use of hyperboloid knurling tools allows for the roughness of their involute teeth profile to be achieved in accordance with accuracy class 5..7.

EDN: OXXSXV, https://elibrary/oxxsxv

Keywords: hyperboloid knurling, tooth forming, experiment planning, surface layer, roughness

Технологии изготовления зубьев зубчатой передачи достаточно многообразны и насчитывают более 50 наименований [1, 2]. Применение каждой конкретной технологии формообразования зубьев обеспечивает определенную шероховатость их профиля [3–7], которая является одним из существенных параметров качества рабочей поверхности, влияющей на эксплуатационные характеристики зубчатой передачи [8–12].

Среди современных технологий формообразования зубчатых профилей (зубчатые и червячные колеса, шлицы) пластическим деформированием следует выделить накатку, позволяющую совместить процесс зубообразования, окончательную отделку рабочих поверхностей и их упрочнение [13–18].

Создание и применение новых типов такого инструмента включает в себя решение таких научно-технических вопросов, как разработка методика определения влияния конструктивных параметров накатников на шероховатость накатанных зубьев.

В зависимости от формы производящей поверхности различают реечные, цилиндрические, дисковые и червячные накатники [1, 13].

В настоящее время широкое распространение получают накатники, профиль производящей поверхности которых образован на основе цилиндра. С их помощью происходит формообразование зубчатых профилей в плоском станочном зацеплении, когда оси накатника и заготовки параллельны. Такие накатники отличает относительная простота конструкции и технологии изготовления. Производительность формообразования зубьев при их применении повышается более чем в 10 раз по сравнению с таковой после обработки червячной модульной фрезой [13].

Однако цилиндрические накатники имеют определенные недостатки, вызванные относительным скольжением зубьев накатываемого колеса и инструмента. Вследствие этого наблюдается пластическое деформирование поверхности зуба, когда материал на его рабочей поверхности сдвигается от головки и ножки зуба в зоне делительной окружности, что приводит к образованию выступа. На противоположной стороне зуба происходит пластическое деформирование материала из зоны делительной окружности к его головке и ножке, вызывающее образование впадины [19].

После формообразования зубьев цилиндрическим накатником обычно требуется дополнительная технологическая обработка их поверхностей, например шлифовка. В результате такой обработки с рабочей поверхности зубьев удаляется упрочненный слой металла, вследствие чего снижаются производительность их формообразования и прочность.

Кроме того, цилиндрические накатники позволяют выполнять упрочняюще-сглаживающую обработку только основной рабочей поверхности зубьев, не захватывая их переходные поверхности, в частности галтели ножек. Поэтому для предотвращения образования усталостных трещин в зоне ножек зубьев приходится применять дополнительные технологические операции для их обработки.

Уменьшить указанные недостатки можно при формообразовании зубьев в пространственном станочном зацеплении, когда оси инструмента и заготовки скрещиваются. Профиль производящей поверхности таких накатников должен быть образован, например поверхностью однополостного гиперболоида.

Теоретическая оценка взаимовлияния конструктивных параметров накатника с произво-

дящей поверхностью сложной формы на качество поверхностного слоя образованных поверхностей с точностью, достаточной для инженерных расчетов, является сложной, а в ряде случаев неразрешимой задачей. Полученные результаты требуют экспериментального подтверждения.

Несмотря на существующие исследования [20, 21] этот вопрос изучен недостаточно.

Цель работы — экспериментальное исследование и получение на его базе эмпирической модели для оценки влияния конструктивных параметров накатного инструмента с гиперболоидной производящей поверхностью на шероховатость рабочих поверхностей формообразованных эвольвентных зубьев.

Материалы и методы. Исследование выполнено путем натурного эксперимента. Этот подход находит широкое применение при изучении взаимосвязей параметров качества, в частности шероховатости рабочих поверхностей, изделий машиностроения с конструктивно-технологическими параметрами их изготовления [4, 22–25].

В качестве основных геометрических параметров накатника с гиперболоидной производящей поверхностью (далее ГН) выступали: z — количество витков (зубьев); β — угол наклона витков (зубьев); d_d — делительный диаметр витков в наименьшем сечении гиперболоидной поверхности.

Все перечисленные параметры являются независимыми при проектировании ГН и могут изменяться в широких пределах. В качестве зависимого (исследуемого) параметра принят параметр шероховатости поверхности зубьев *Ra*, формообразованных в процессе накатки.

Введем допущение, что параметр шероховатости рабочей поверхности является немонотонной и нелинейной функцией геометрических параметров ГН, которая описывается регрессионной зависимостью

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{m} b_i x_i + \sum_{i,j=1}^{m} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{m} b_{ii} x_i^2 , \qquad (1)$$

где b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} — коэффициенты регрессии; x_i, x_j — независимые параметры; m — количество независимых параметров.

В этом случае планирование эксперимента осуществляется на основе плана второго порядка — центрального композиционного униформ-рототабельного плана Бокса — Хантера [22].

Достоинство такого плана заключается в малом объеме вычислений, так как все коэффициенты регрессии определяются независимо друг от друга. Также следует учитывать, что для исследуемого ГН нет достоверной информации об ориентации поверхности отклика. Поэтому рототабельность центрального композиционного плана достигается применением звездного плеча, составляющего ±1,682.

Уровни и интервалы варьирования независимых параметров ГН приведены в табл. 1, где в скобках указаны их кодовые обозначения.

Для натурного эксперимента использованы ГН с нормальным модулем m_n = 1 мм и конструктивными параметрами, приведенными в табл. 1. Материал ГН — быстрорежущая сталь Р6М5 твердостью 61…63 HRC с параметром шероховатости рабочей поверхности Ra = = 0,25 мкм. Согласно плану эксперимента, изготовлено пятнадцать ГН с разной комбинацией геометрических параметров.

Технологический процесс накатки цилиндрических прямозубых зубчатых колес реализован на зубофрезерном вертикальном станке (полуавтомате) 5Д32, имеющем достаточную жесткость для натурного эксперимента. Режимы формообразования зубьев при применении ГН с различными геометрическими параметрами были одинаковыми и назначались с учетом

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования независимых параметров ГН

Параметр	Уровень варьирования					Интервал варьирования (Δx_i)
	Основной (0)	Верхний (+1)	Нижний (–1)	Верхняя звездная точка (+1,682)	Нижняя звездная точка (–1,682)	
$z(x_1)$, шт.	23	29	17	33,0	13	6
$d_d(x_2)$, мм	56	71	41	81,4	31	15
$\beta(x_3)$, град	29	38	20	44,0	14	9

рекомендаций по выбору режимов накатки, приведенных в литературных источниках.

В качестве материала для накатываемых зубчатых колес использована сталь 40Х, твердость заготовок соответствовала 28…32 HRC.

Для измерения параметра шероховатости рабочих поверхностей зубьев использован профилограф-профилометр Talysurf 5 System. Проведены три параллельных опыта с определением среднего значения параметра шероховатости поверхности накатанного зуба и округлением его до стандартного значения согласно ГОСТ 2789–73 (Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики).

Матрица и результаты центрального композиционного униформ-рототабельного планирования эксперимента при m = 3 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Матрица и результаты центрального композиционного униформ-рототабельного планирования эксперимента

Номер эксперимента	x_1	x_2	x_3	Ra, мкм
1	+1	+1	+1	0,32
2	–1	+1	+1	0,40
3	+1	–1	+1	0,40
4	–1	–1	+1	0,63
5	+1	+1	–1	0,32
6	–1	+1	–1	0,32
7	+1	–1	–1	0,40
8	–1	–1	–1	0,40
9	+1,682	0	0	0,32
10	–1,682	0	0	0,40
11	0	+1,682	0	0,40
12	0	–1,682	0	0,63
13	0	0	+1,682	0,32
14	0	0	–1,682	0,32
15	0	0	0	0,32
16	0	0	0	0,32
17	0	0	0	0,40
18	0	0	0	0,32
19	0	0	0	0,32
20	0	0	0	0,40

Результаты исследования и их обсуждение. Для оценки экспериментальных результатов использован критерий Кохрена [22, 26] при доверительной вероятности 0,95. Дисперсия результатов является однородной, так как значение критерия Кохрена меньше критического: $G = 0{,}264 < G_{0,95}(2{,}20) = 0{,}2705$.

Обработка результатов эксперимента позволила представить уравнение регрессии (1) в виде математической модели

$$y = 0{,}37 - 0{,}033x_1 - 0{,}034x_2 + 0{,}023x_3 + \\ + 0{,}019x_1x_2 - 0{,}039x_1x_3 - 0{,}019x_2x_3 + \\ + 0{,}00426x_1^2 + 0{,}018x_2^2 - 0{,}00989x_3^2. \qquad (2)$$

Проверка модели (2) показала, что все коэффициенты регрессии являются статистически значимыми, а входящие в ее состав факторы выражены в кодированном масштабе. Для преобразования кодированных значений параметров в натуральные и обратно использованы следующие зависимости:

$$x_1 = \frac{z - 23}{6};$$

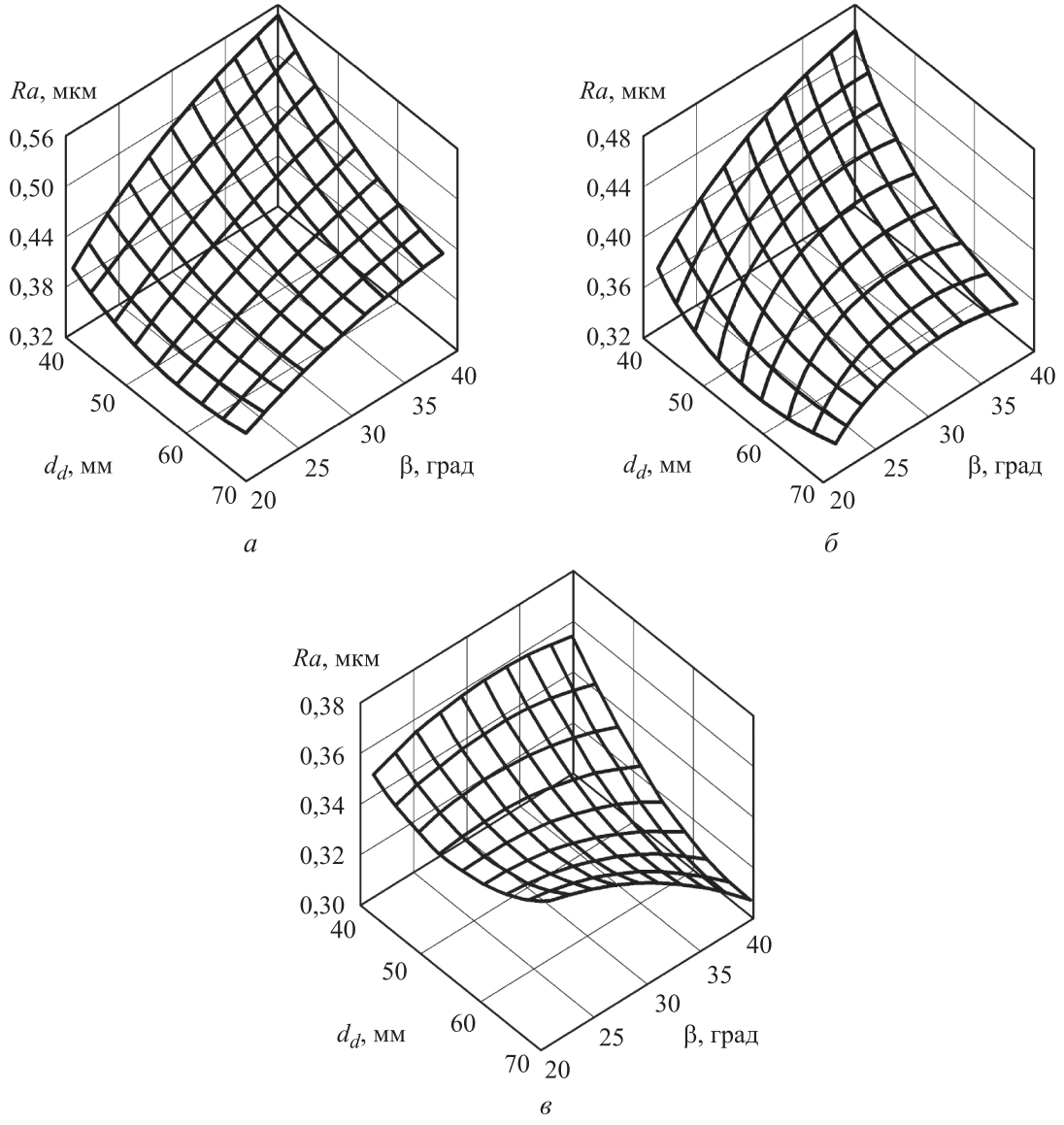
$$x_2 = \frac{d_d - 56}{15};$$

$$x_3 = \frac{\beta - 29}{9}.$$

Проверка адекватности математической модели (2), проведенная на основе критерия Фишера [22, 26] с заданной доверительной вероятностью 95 %, показала, что расчетное значение критерия Фишера меньше критического: $F = 1{,}85 < F_{0,95}(10{,}59) = 1{,}99$. Следовательно, модель адекватно описывает поверхность отклика.

Полученные путем расчета по математической модели (2) зависимости параметра шероховатости поверхности формообразованных зубьев Ra от основных конструктивных параметров ГН — угла наклона витков β и их делительного диаметра в наименьшем сечении гиперболоидной поверхности d_d — при количестве витков z = 17, 23 и 29 шт. приведены на рисунке.

Видно, что при применении ГН параметр шероховатости профилей эвольвентных зубьев цилиндрических колес Ra = 0,30…0,55 мкм, что согласно ГОСТ Р 70117–2022 (Шероховатость поверхности. Рекомендации по выбору) соответствует степени точности 5–7 по ГОСТ



Зависимости параметра шероховатости поверхности формообразованных зубьев *Ra* от угла наклона витков β и их делительного диаметра в наименьшем сечении гиперболоидной поверхности d_d при количестве витков z = 17 (*а*), 23 (*б*) и 29 шт. (*в*)

1643–81 (Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски).

Полученные значения параметра шероховатости соответствуют таким видам обработки зубьев как чистовое зубофрезерование (после термообработки), шевингование (после точного фрезерования) и шлифование.

Выводы

1. Применение ГН позволяет выполнять формообразование эвольвентных зубьев на серийном технологическом оборудовании и обеспечивает параметру шероховатости их профиля степень точности 5–7.

2. Установлено, что зависимость шероховатости профилей зубьев от конструктивных параметров ГН является нелинейной и определяется их комбинацией.

3. Применение только одного зубообрабатывающего инструмента (ГН) при выполнении двух технологических операций — формообразовании и финишной обработке профиля зубьев — позволяет упростить технологический процесс изготовления эвольвентных зубьев.

Литература

[1] Калашников А.С., Моргунов Ю.А., Калашников П.А. *Современные методы обработки зубчатых колес*. Москва, Спектр, 2012. 239 с.

[2] Radzevich S.P. *Gear cutting tools*. CRC Press, 2010. 786 p.

[3] Кондрашов А.Г., Сафаров Д.Т., Фасхутдинов А.И. Характеристики точности и шероховатости поверхностей зубьев зубчатых венцов при формообразовании стандартизованными дисковыми фрезами на станках с ЧПУ. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2023, № 11, с. 642–647.

[4] Кане М.М., Шелег В.К., Кравчук М.А. и др. Анализ взаимосвязей некоторых параметров качества поверхностей зубьев цилиндрических шестерен с режимами зубофрезерования. *Актуальные вопросы машиноведения*, 2019, т. 8, с. 251–255.

[5] Солдатов А.Г. Исследование шероховатости при шлифовании зубчатых колес. *Вестник РГУПС*, 2023, № 1, с. 44–48.

[6] Пешехонов К.Ю., Тарапанов А.С. Прогнозирование шероховатости при формообразовании зубьев спироидных колес. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2018, № 3, с. 82–87.

[7] Ding H., Rong S., Zhang X. et al. Roughness tooth surface loaded contact pressure forecasting model for face-hobbed hypoid gears. *Adv. Eng. Inform.*, 2024, vol. 60, art. 102399, doi: https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102399

[8] Агапов С.И., Федянова Н.А., Серов А.С. и др. Расчет шероховатости поверхности эвольвентных сторон зубьев. *Известия ВолгГТУ*, 2012, № 13, с. 6–8.

[9] Рубан А.Р., Мамонтов В.А. Влияние шероховатости переходных поверхностей зубьев на долговечность цементируемых зубчатых колес. *Вестник Астраханского государственного технического университета*, 2005, № 2, с. 52–54.

[10] Гришина Е.А., Деунежева М.А. Метрологическое и технологическое обеспечение процесса исследования качества боковой поверхности зубьев крупномодульных колес при отделочно-упрочняющей обработке ППД. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2017, т. 2, № 13, с. 779–781.

[11] Irgashev A., Shaabidov Sh.A., Irgashev B.A. et al. Roughness of meshing gear teeth. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*., 2022, vol. 1112, art. 012003, doi: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1112/1/012003

[12] Liu H., Liu H., Zhu C. et al. Tribological behavior of coated spur gear pairs with tooth surface roughness. *Friction*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 117–128, doi: https://doi.org/10.1007/s40544-017-0193-3

[13] Лындин В.А. *Инструмент для накатывания зубьев и шлицов повышенной точности*. Москва, Машиностроение, 1988. 144 с.

[14] Виноградов В.М. Особенности высокопроизводительных станков для калибрования зубьев цилиндрических колес средних модулей. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2009, № 12, с. 50–54.

[15] Востров В.Н., Кузнецов П.А., Новиков А.В. и др. Накатывание внутренних эвольвентных зубьев на порошковых спеченных заготовках. *Металлообработка*, 2016, № 3, с. 26–32.

[16] Буянов А.С., Черепахин А.А. Особенности холодного чистового калибрования зубчатых колес автомобильных трансмиссий. *Автомобильная промышленность*, 2011, № 8, с. 32–33.

[17] Mikhaylov A., Grubka R., Lahin A. et al. Structural and technology support quality improvement of gear coupling. *Appl. Mech. Mater.*, 2013, vol. 371, pp. 3–7. doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.371.3

[18] Cherepakhin A.A., Lyalyakin V.P. Features of the choice of knurl material for cold calibration of cylindrical mid-module gear wheels. *Russ. Engin. Res.*, 2024, vol. 44, no. 1, pp. 74–77. doi: https://doi.org/10.3103/S1068798X24010106

[19] Витренко В.А., Стоянов А.А., Титова Л.Н. и др. Инструмент и особенности накатки зубьев тяговых зубчатых колес подвижного состава. *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля*, 2023, № 12, с. 117–121.

[20] Витренко О.С. Методика выбора геометрии накатного инструмента в зависимости от геометро-кинематических параметров накатки. *Известия КГТУ*, 2018, № 49, с. 241–248.

[21] Кузьменко Н.Н., Михайлова А.Д. Некоторые геометро-кинематические параметры процесса накатки зубьев цилиндрических зубчатых колес при помощи многозаходных гиперболоидных накатников. *Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля,* 2023, № 9, с. 156–158.

[22] Спиридонов А.А. *Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов*. Москва, Машиностроение, 1981. 184 с.

[23] Силвио С., Юсубов Н.Д., Амирли С.Ф. и др. Исследование параметра шероховатости поверхности хромоникелевой стали после гидроабразивной обработки с применением полного факторного эксперимента. *Вестник машиностроения*, 2025, т. 104, № 1, с. 60–64, doi: https://doi.org/10.36652/0042-4633-2025-104-1-60-64

[24] Сединин И.Н., Макаров В.Ф., Шлык П.И. и др. Исследование шероховатости поверхности при полном факторном эксперименте твердого торцевого фрезерования. *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*, 2019, т. 2, с. 179–182.

[25] Moayyedian M., Mohajer A., Kazemian M.G. et al. Surface roughness analysis in milling machining using design of experiment. *SN Appl. Sci.*, 2020, vol. 2, no. 10, art. 1698, doi: https://doi.org/10.1007/s42452-020-03485-5

[26] Степнов М.Н., Шаврин А.В. *Статистические методы обработки результатов механических испытаний*. Москва, Машиностроение, 2005. 399 с.

References

[1] Kalashnikov A.S., Morgunov Yu.A., Kalashnikov P.A. *Sovremennye metody obrabotki zubchatykh koles* [Modern methods of processing gears]. Moscow, Spektr Publ., 2012. 239 p. (In Russ.).

[2] Radzevich S.P. *Gear cutting tools*. CRC Press, 2010. 786 p.

[3] Kondrashov A.G., Safarov D.T., Faskhutdinov A.I. Characteristics of the accuracy and roughness of the surfaces of the teeth of the gear rings when forming with standardized disk cutters on CNC machines. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2023, no. 11, pp. 642–647. (In Russ.).

[4] Kane M.M., Sheleg V.K., Kravchuk M.A. et al. Analysis of interrelations of some parameters of quality of teeth surfaces of spur gears with gear milling modes. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya* [Topical Issues of Mechanical Engineering], 2019, vol. 8, pp. 251–255. (In Russ.).

[5] Soldatov A.G. Study of roughness in grinding gear wheel process. *Vestnik RGUPS*, 2023, no. 1, pp. 44–48. (In Russ.).

[6] Peshekhonov K.Yu., Tarapanov A.S. Prediction of roughness in the forming of the teeth spiroid gears. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2018, no. 3, pp. 82–87. (In Russ.).

[7] Ding H., Rong S., Zhang X. et al. Roughness tooth surface loaded contact pressure forecasting model for face-hobbed hypoid gears. *Adv. Eng. Inform.*, 2024, vol. 60, art. 102399, doi: https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102399

[8] Agapov S.I., Fedyanova N.A., Serov A.S. et al. Calculation of surface roughness of involute sides of teeth. *Izvestiya VolgGTU* [Izvestia Volgograd State Technical University], 2012, no. 13, pp. 6–8. (In Russ.).

[9] Ruban A.R., Mamontov V.A. Influence of a rough transitive surface of teeth onto durability of cemented gear-wheels. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Astrakhan State Technical University], 2005, no. 2, pp. 52–54. (In Russ.).

[10] Grishina E.A., Deunezheva M.A. Metrological and technological support of process of studying the quality of lateral surface of the teeth of large-modular wheels during finishing processing PPD. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavtiki*, 2017, vol. 2, no. 13, pp. 779–781. (In Russ.).

[11] Irgashev A., Shaabidov Sh.A., Irgashev B.A. et al. Roughness of meshing gear teeth. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*., 2022, vol. 1112, art. 012003, doi: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1112/1/012003

[12] Liu H., Liu H., Zhu C. et al. Tribological behavior of coated spur gear pairs with tooth surface roughness. *Friction*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 117–128, doi: https://doi.org/10.1007/s40544-017-0193-3

[13] Lyndin V.A. *Instrument dlya nakatyvaniya zubyev i shlitsov povyshennoy tochnosti* [High-precision tooth and spline rolling tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 144 p. (In Russ.).

[14] Vinogradov V.M. Features of efficient equipments for cogs calibration of middle module spur gears. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2009, no. 12, pp. 50–54. (In Russ.).

[15] Vostrov V.N., Kuznetsov P.A., Novikov A.V. et al. Internal rolling the involute teeth on powder sintered body. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2016, no. 3, pp. 26–32. (In Russ.).

[16] Buyanov A.S., Cherepakhin A.A. Features of a cold fair calibration of tooth gears of automobile transmissions. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2011, no. 8, pp. 32–33. (In Russ.).

[17] Mikhaylov A., Grubka R., Lahin A. et al. Structural and technology support quality improvement of gear coupling. *Appl. Mech. Mater*., 2013, vol. 371, pp. 3–7. doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.371.3

[18] Cherepakhin A.A., Lyalyakin V.P. Features of the choice of knurl material for cold calibration of cylindrical mid-module gear wheels. *Russ. Engin. Res*., 2024, vol. 44, no. 1, pp. 74–77. doi: https://doi.org/10.3103/S1068798X24010106

[19] Vitrenko V.A., Stoyanov A.A., Titova L.N. et al. Instruments and peculiarities of rolling stock traction gear wheels teeth knurling. *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalya* [Vestnik Lugansk Vladimir Dahl State University], 2023, no. 12, pp. 117– 121. (In Russ.).

[20] Vitrenko O.S. Methodology for selecting geometry of a knurling instrument depending on geometric-kinematic parameters of knurling. *Izvestiya KGTU* [KSTU News], 2018, no. 49, pp. 241–248. (In Russ.).

[21] Kuzmenko N.N., Mikhaylova A.D. Some geometric-kinematic parameters of the process of cylindrical gear teeth rolling with the help of multiturn hyperboloidal knurlers multi-turn hyperboloid knurlers. *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalya* [Vestnik Lugansk Vladimir Dahl State University], 2023, no. 9, pp. 156–158. (In Russ.).

[22] Spiridonov A.A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 184 p. (In Russ.).

[23] Silvio S., Yusubov N.D., Amirli S.F. et al. Research of the surface roughness parameter of chromium-nickel steel after hydroabrasive machining using a full factorial experiment. *Vestnik mashinostroeniya*, 2025, vol. 104, no. 1, pp. 60–64, doi: https://doi.org/10.36652/0042-4633-2025-104-1-60-64 (in Russ.).

[24] Sedinin I.N., Makarov V.F., Shlyk P.I. et al. Study on surface roughness in a full factorial experiment of hard face milling. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*, 2019, vol. 2, pp. 179–182. (In Russ.).

[25] Moayyedian M., Mohajer A., Kazemian M.G. et al. Surface roughness analysis in milling machining using design of experiment. *SN Appl. Sci*., 2020, vol. 2, no. 10, art. 1698, doi: https://doi.org/10.1007/s42452-020-03485-5

[26] Stepnov M.N., Shavrin A.V. *Statisticheskie metody obrabotki rezultatov mekhanicheskikh ispytaniy* [Statistical methods for processing the results of mechanical tests]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 399 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 30.01.2026

Информация об авторах

ВИТРЕНКО Ольга Сергеевна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теория механизмов и машин и детали машин». ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» (236022, Калининград, Российская Федерация, Советский пр-т, д. 1, e-mail: olga.vitrenko@klgtu.ru).

ШАРКОВ Олег Васильевич — доктор технических наук, доцент, профессор высшей школы киберфизических систем. ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта» (236016, Калининград, Российская Федерация, ул. А. Невского, д. 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru).

Information about the authors

VITRENKO Olga Sergeevna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Associate Professor Department of Theory of Mechanisms and Machines and Machine Parts. Kaliningrad State Technical University (236022, Kaliningrad, Russian Federation, Sovetsky Ave., Bldg. 1, e-mail: olga.vitrenko@klgtu.ru).

SHARKOV Oleg Vasil'yevich — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor of Higher School of Cyber-Physical Systems. Immanuel Kant Baltic Federal University (236016, Kaliningrad, Russian Federation, A. Nevskogo St., Bldg. 14, e-mail: osharkov@kantiana.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:
Витренко О.С., Шарков О.В. Экспериментальное исследование влияния конструктивных параметров накатного инструмента на качество поверхности зубьев. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 11, с. 70–78.

Please cite this article in English as:
Vitrenko O.S., Sharkov O.V. Experimental study of the effect of design parameters of a rolling tool on the quality of the tooth surface. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 11, pp. 70–78.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям сборник тезисов IV Международного конгресса

«Русский инженер»

В сборник вошли тезисы докладов участников IV Международного конгресса «Русский инженер» (Москва, 27–31 октября 2026 года). Конгресс является международной площадкой для взаимодействия университетов, научных организаций и промышленного сектора для обмена научными знаниями и представления перспективных инженерных разработок и развития технологического сотрудничества. Особое внимание уделяется подготовке высококвалифицированных инженерных кадров, обеспечению технологической независимости отечественной промышленности и развитию традиций русской инженерной школы. Материалы сборника отражают результаты научных исследований и инженерных разработок, посвященных актуальным вопросам технологического лидерства, развития критических и сквозных технологий, космической техники, искусственного интеллекта, математического моделирования, робототехники, современных производственных технологий и инженерного образования. Рассматриваются вопросы междисциплинарного взаимодействия, совершенствования подготовки инженерных кадров и внедрения научных достижений в промышленность.

Для научных работников, инженеров, специалистов промышленных предприятий, преподавателей, аспирантов и студентов технических вузов.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; https://press.bmstu.ru