

Научная статья

УДК 621.941.01

doi: 10.30987/2223-4608-2024-14-24

Влияние износа инструмента в процессе физического моделирования шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес на параметр шероховатости

Андрей Андреевич Маликов¹, д.т.н.

Андрей Викторович Сидоркин², к.т.н.

Валерий Дмитриевич Артамонов³, д.т.н.

Юрий Вячеславович Ковалев⁴, аспирант

^{1, 2, 3, 4} Тульский государственный университет, Тула, Россия

¹ tppizi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6757-5584>

² alan-a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ v.d.art@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ y@vkvov.me, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Рассмотрены основные вопросы, связанные с результатами проведенного экспериментального исследования, направленного на моделирование комбинированного (режущо-деформирующего) чистового процесса зубообработки – шевингования – прикатывания цилиндрических зубчатых колес, в процессе точения специальным комбинированным режущо-деформирующим инструментом – резцом цилиндрической заготовки, разделенной на равные рабочие участки. Благодаря оригинальной методике исследования, в ходе моделируемого процесса, за один установ компактной цилиндрической заготовки, на токарном станке с ЧПУ имитируется зубообработка достаточно крупной партии цилиндрических колес-представителей, обладающих среднестатистическими параметрами, из нескольких тысяч штук. Проведен анализ результатов эксперимента, позволяющего, в лабораторных условиях, получить сведения о ходе зубообработки большой партии зубчатых колес. Определен параметр шероховатости обработки участков заготовки, выявлены границы наступления технологического износа инструмента по данному параметру. Выявленная картина износа инструмента представляется, при этом следующей: превалирующий износ инструмента происходит по задней поверхности ввиду его конструктивной особенности – нулевого заднего угла, усугубляющийся технологической особенностью процесса (шевингования – прикатывания), при которой задняя поверхность участвует в поверхностном пластическом деформировании, сминая слой металла при воздействии существенной нормальной силы, и как следствие, возникающей силы трения между его задней поверхностью и поверхностью обрабатываемой заготовки. Износ инструмента по передней поверхности, сопровождаемый затуплением его режущей кромки дополнительно ухудшает условия протекания процесса резания (при съеме малых припусков порядка 0,02 мм), и увеличивая долю поверхностной пластической деформации (в процессе шевингования – прикатывания). Это, в итоге, повышает долю материала обрабатываемой заготовки, удаляемую не резанием, а поверхностным пластическим деформированием, тем самым еще сильнее усугубляя износ инструмента по задней поверхности.

Ключевые слова: шевингование – прикатывание, шероховатость, износ, цилиндрические зубчатые колеса, процесс, моделирование, эксперимент, инструмент

Для цитирования: Маликов А.А., Сидоркин А.В., Артамонов В.Д., Ковалев Ю.В. Влияние износа инструмента в процессе физического моделирования шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес на параметр шероховатости // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 5 (155). С. 14–24. doi: 10.30987/2223-4608-2024-14-24

Tool degradation effect on roughness factor in the process of physical modeling of cylindrical gear shaving and rolling

Andrey A. Malikov¹, D. Eng.
Andrey V. Sidorkin², Ph.D. Eng.
Valery D. Artamonov³, D. Eng.
Yuri V. Kovalev⁴, PG student

^{1, 2, 3, 4} Tula State University, Tula, Russia

¹ tppizi@yandex.ru

² alan-a@mail.ru

³ v.d.art@mail.ru

⁴ y@vkov.me

Abstract. The main issues related to the results of an experimental study aimed at modeling of the combined (cutting-deforming) finishing process of a gear processing, i.e. cylindrical gear shaving and rolling, under turning with a special combined cutting-deforming tool, which is a single-tip tool of a cylindrical work, divided into equal working areas. Due to the proprietary exploratory procedure used for prototype process, in one operation of a compact cylindrical work, a gear processing of a sufficiently large batch of horizontal wheels-representatives with average parameters, consisting of several thousand pieces, is simulated on a CNC lathe. The analysis of the results of the experiment was treated, allowing us to obtain information about gear processing of a large batch of gears in laboratory conditions. The roughness parameter of the work on workpiece areas is determined, the boundaries of tool degradation for this parameter are revealed. The revealed pattern of tool degradation appears to be the following: the prevailing wear of the tool occurs along the back surface due to its design feature, i.e. zero angle of its back, aggravated by the technological characteristics of the process (shaving - rolling), in which the back is involved in the surface plastic deformation, in particular, crushing a metal layer under the influence of a significant normal load. This results in frictional load taking place between its back surface and the surface of the processed workpiece. Tool degradation along the front surface, accompanied by its tool cutter blunting of its cutting edge, contributes to further deterioration of cutting process conditions (when stock removal of about 0.02 mm), and at the same time increases the proportion of surface plastic deformation (when shaving-rolling). This, as a result, increases the workpiece material share, which should be removed not by cutting, but by surface plastic deformation, thereby further redoubling a wear bit in its back surface.

Keywords: shaving – rolling, roughness, degradation (wear), cylindrical gears, process, modeling, experiment, tool

For citation: Malikov A.A., Sidorkin A.V., Artamonov V.D., Kovalev Yu.V. Tool degradation effect on roughness factor in the process of physical modeling of cylindrical gear shaving and rolling / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 5 (155). P. 14–24. doi: 10.30987/2223-4608-2024-14-24

Введение

В Тульском государственном университете на протяжении последних десятилетий серьезное внимание уделяется аспектам построения высокопроизводительных ресурсосберегающих процессов комбинированной (режущо-деформирующей) чистовой зубообработки цилиндрических зубчатых колес (ЦЗК). В многочисленных исследованиях профессоров Валикова Е.Н., Ямникова А.С., Борискина О.И. и их учеников, представленных в работах [1 – 6], отмечается высокая эффективность процесса шевингования-прикатывания для чистовой стадии зубообработки при обеспечении стабильно высоких точностных и качественных параметров венцов, обрабатываемых ЦЗК.

Для реализации рассматриваемого процесса, в условиях производства с большим объемом выпуска, требуется применение специальных инструментов – шеверов-прикатников,

конструкции которых рассчитываются и проектируется индивидуально для каждого зубчатого колеса [3, 5, 7]. Шевера-прикатники ввиду сложной конфигурации режущих элементов и достаточно больших массогабаритных параметров (габаритный диаметр d_a до 250 мм, масса m до 3 кг), как правило, изготавливаются из быстрорежущей стали, в частности, марки Р6М5 ГОСТ 19265-73. Поскольку шевер-прикатник является дорогостоящим и сложным в изготовлении инструментом, то, очевидно, что аспектам его проектирования, изготовления и эксплуатации должно быть уделено серьезное внимание. В частности, одной из важнейших технико-экономических характеристик, определяющих эффективность использования такого инструмента при производстве ЦЗК является ресурс его работы.

Одним из важнейших показателей, определяющих величину допустимого технологического износа инструмента, после которого требуется его замена, является шероховатость

поверхностей деталей, подвергающихся обработке. Для боковых (эвольвентных) поверхностей зубьев ЦЗК, этот показатель, усредненно, находится в пределах $Ra = 1,6 \text{ мкм}$ [8 – 10].

Проведение комплексного экспериментального исследования, направленного на углубленное изучение рассматриваемого вопроса подразумевает обработку большого объема ЦЗК с использованием специализированного технологического оборудования, что в условиях современных реалий, является весьма затруднительным. Поэтому, коллективом ученых кафедры «Технология машиностроения» ТулГУ была предложена концепция физического моделирования процесса шевингования-прикатывания ЦЗК по аналогии с процессом точения [11] и разработана методика проектирования и изготовления специального режущо-деформирующего инструмента [12], позволяющие, с высокой степенью точности, изучить ход протекания процесса комбинированной чистой зубообработки и механизм износа зубьев инструмента, задействованного в нем.

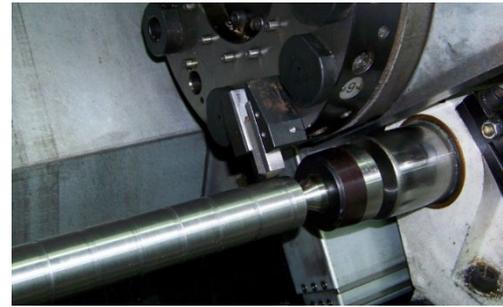
Основные принципы построения и особенности реализации экспериментального исследования

Процесс моделирования осуществляется в лабораторных условиях кафедры «Технология машиностроения» ТулГУ. Экспериментальные исследования выполняются на базе токарного станка с ЧПУ TOP TURN CNC-S16C (рис. 1 и рис. 2), обладающего высокой точностью, достаточной жесткостью и необходимым набором технологических возможностей.

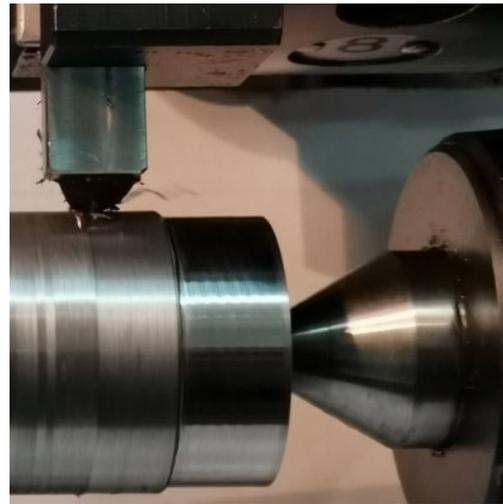


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки на базе токарного станка с ЧПУ TOP TURN CNC-S16C

Fig. 1. General view of the experimental installation based on a CNC lathe TOP TURN CNC-S16C



а)



б)

Рис. 2. Фотография зоны обработки заготовки на токарном станке с ЧПУ TOP TURN CNC-S16C:
а – общий вид; б – крупным планом

Fig. 2. Photo of the workpiece processing area on a CNC lathe TOP TURN CNC-S16C:
а – general view; б – detail shot

В ходе эксперимента комбинированной (режущо-деформирующей) обработке подвергается цилиндрическая заготовка, выполняемая из стали 20Х ГОСТ 4543-2016. Заготовка имеет диаметр $D_{\text{заг}} = 40 \text{ мм}$ и длину $L_{\text{заг}} = 390 \text{ мм}$, что обеспечивает соотношение $L_{\text{заг}} / D_{\text{заг}} < 10$. Такое соотношение, при установке заготовки в трехлапчатом самоцентрирующем патроне с поджимом задним вращающимся центром позволяет добиться высокой точности и качества обработки при достаточной жесткости элементов технологической системы.

Если рассмотреть цилиндрическое зубчатое колесо-представитель, имеющий среднестатистические параметры: $m = 2 \text{ мм}$; $z_1 = 20$; $x = 0$, то работа специального режущо-деформирующего инструмента на одном

рабочем участке заготовки будет эквивалентна обработке $n_{ЦЗК} \text{ р.у.} \approx 108$ колес, а совокупное число эквивалентных обработанных ЦЗК для всей заготовки – $n_{ЦЗК \text{ заг.}} \approx 3240$ [13].

Конструкция заготовки [13] показана на эскизе, представленном на рис. 3. Заготовка

имеет в своем составе тридцать рабочих участков I...XXX, длиной по 5 мм каждый. Участки разделены канавками, шириной $b_k = 5$ мм, предназначенными для выхода специального режущо-деформирующего инструмента.

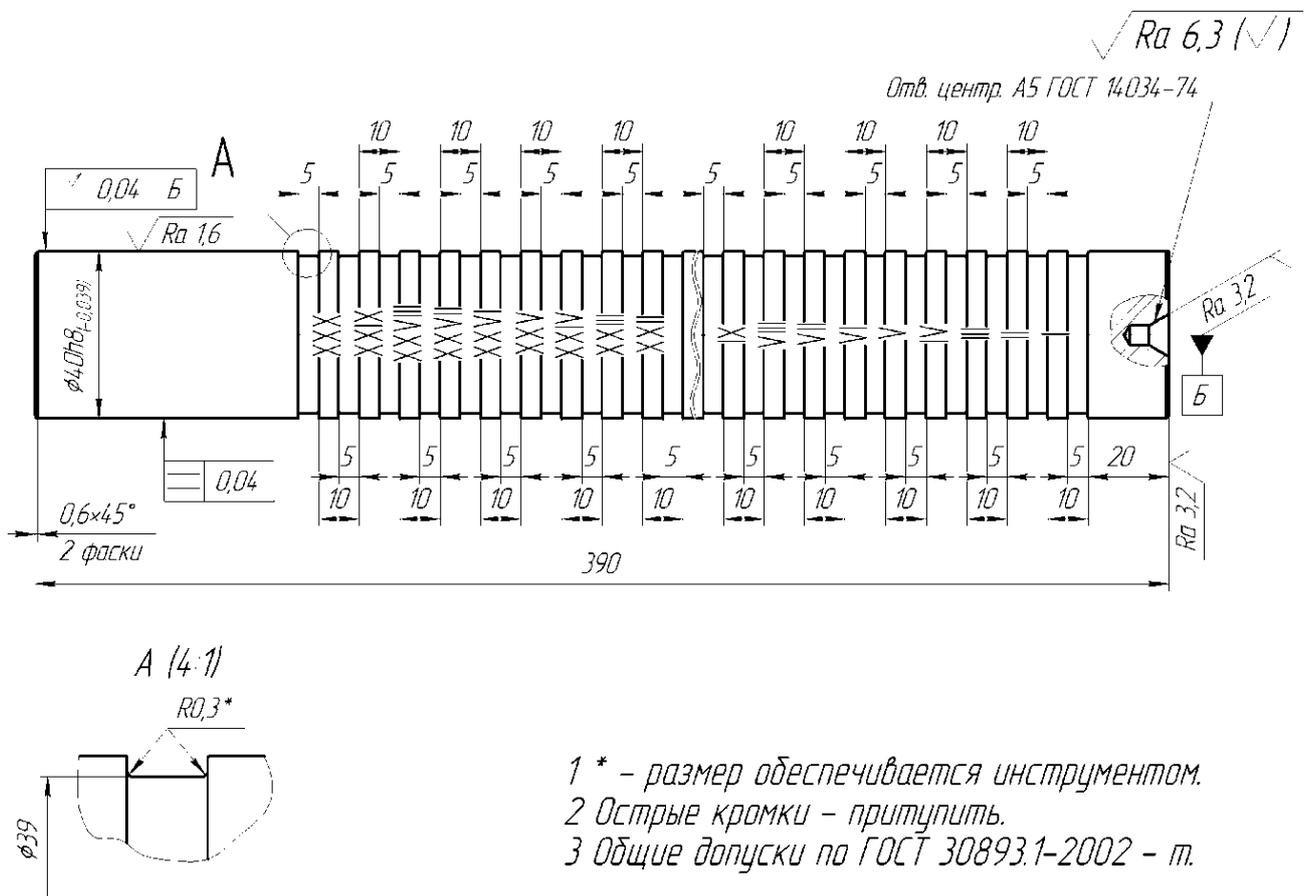


Рис. 3. Конструкция экспериментальной заготовки

Fig. 3. Experimental workpiece design

Основной задачей исследования является выявление динамики изменения показателя шероховатости обрабатываемых поверхностей цилиндрической заготовки в процессе моделирования шевингования-прикатывания ЦЗК и стабильность поддержания рассматриваемого показателя (в заданных пределах) в процессе размерного износа инструмента. Для этого использовалась заготовка, все тридцать участков которой были обработаны, после ее установки на станок с ЧПУ, токарным резцом, имеющим небольшой период наработки (прошедшим стадию приработки). После чего, не

снимая заготовки со станка, ее характерные участки были промерены портативным профилометром Hommel-Etamic W5 (основные характеристики которого приведены на интернет-сайте [14]). Шероховатость обработанных поверхностей (после точения) колебалась в пределах $Ra = 1,48...1,67$ мкм. Промеры производились после остывания заготовки до температуры 25 ± 5 °C и удаления с нее остатков смазочно-охлаждающей жидкости СОЖ.

После чего производилась последовательная обработка всех тридцати участков заготовки на одном наладочном размере

(по оси X). Обработка осуществлялась специальным резцом [12], установленным в блоке резцедержателя (рис. 4).

По завершении обработки производилось построение профилограмм и измерение параметра шероховатости обработанных участков заготовки профилометром Mitutoyo Surftest SJ-301 (основные характеристики которого приведены на интернет-сайте [15]).



Рис. 4. Фотография инструмента, установленного в резцедержателе

Fig. 4. Photo of the tool installed in the tool holder

Как ранее отмечалось в работе [16], лимитирующим фактором, определяющим эффективность протекания процесса чистой зубообработки ЦЗК шевингованием – прикатыванием, в условиях производства с большим объемом выпуска, является износ зубьев инструмента – шевера-прикатника по задним поверхностям. Для обеспечения нормальных условий работы инструмента и протекания процесса в целом, весьма важным

становится определение критерия и количественного показателя (в конечном счете, числа обработанных ЦЗК) предельно допустимого износа, при достижении критического значения которого, дальнейшая работа инструмента должна быть прекращена. Однако, критерий затупления не является здесь определяющим. Это объясняется тем, что время работы инструмента до достижения общепринятого (для классического металлорежущего инструмента) критерия оптимального износа не позволяет, в рассматриваемом нами случае, успешно осуществлять его эксплуатацию, т. к. главенствующим здесь становится критерий технологического износа.

Под технологическим условием понимать такой износ, при котором работа инструмента прекращается по технологическим ограничениям: достижении предельного допустимого показателя шероховатости обработанной поверхности, неудовлетворяющего установленным техническим требованиям, вследствие износа инструмента.

Упрощенно процесс экспериментального исследования физического моделирования шевингования – прикатывания ЦЗК заключается в обработке тридцати участков цилиндрической заготовки последовательным многопроходным точением и прикатыванием. Заготовка вращается с частотой 120 об/мин, что соответствует скорости резания 15 м/мин. Подача на оборот заготовки – 0,194 мм/об. Припуск, удаляемый на каждом рабочем ходу – 0,02 мм. После удаления припуска резанем, осуществляемого на прямом вращении заготовки, производится реверсирование ее вращения и удаления аналогичного слоя за счет поверхностного пластического деформирования – прикатывания. Режимы обработки, при этом, остаются те же, что и при резании. Обработка осуществляется за три рабочих цикла (прямое вращение – реверсирование) с периодической радиальной подачей и два цикла выхаживания без подачи. В качестве СОЖ, согласно рекомендациям, изложенным в [17], использовалось индустриальное масло

И-20А. В результате обработки удался припуск порядка 0,12 мм на сторону. Время, затрачиваемое на один, рабочий ход – 12,89 с. Машинное время для обработки одного участка заготовки – 2,11 мин.

Анализ количественных показателей экспериментального исследования

Результаты измерений усредненных значений параметра шероховатости (по участкам), полученных в ходе моделирования процесса шевингования – прикатывания ЦЗК приведены в табл. 1.

1. Шероховатость участков заготовки

1. Roughness of the workpiece areas

№ участка	Ra, мкм	№ участка	Ra, мкм	№ участка	Ra, мкм
1	1,28	11	1,37	21	1,94
2	1,24	12	1,47	22	1,92
3	1,28	13	1,44	23	1,97
4	1,13	14	1,49	24	2,15
5	1,15	15	1,53	25	2,47
6	1,24	16	1,51	26	2,49
7	1,21	17	1,56	27	2,73
8	1,36	18	1,64	28	2,79
9	1,41	19	1,78	29	3,1
10	1,43	20	1,75	30	3,28

Экспериментальная диаграмма, характеризующая динамику изменения параметра шероховатости обработки участков заготовки при моделировании процесса шевингованием – прикатыванием представлена на рис. 5.



Рис. 5. График зависимости шероховатости обработанной поверхности Ra от количества обработанных участков заготовки N

Fig. 5. Graph of the dependence of the roughness of the treated surface Ra on the number of treated areas of the workpiece N

Аппроксимируя, представленную на рис. 5 эмпирическую кривую полиномиальной функцией второй степени можно получить уравнение зависимости шероховатости обработанной поверхности Ra , мкм, в процессе технологического износа инструмента, от количества обработанных им участков заготовки N :

$$Ra = 3,4 \cdot 10^{-3} N^2 - 4,34 \cdot 10^{-2} N + 1,3718.$$

И, как следствие, количества деталей-представителей n :

$$Ra = 3 \cdot 10^{-7} n^2 - 4 \cdot 10^{-4} n + 1,3718.$$

При этом коэффициент достоверности аппроксимации R^2 , проводимой по методу наименьших квадратов, для обоих уравнений, описывающих аппроксимирующие кривые, будет равен 0,974, что является очень хорошим показателем. Таким образом, представленные уравнения, с достаточной степенью точности, отражают динамику влияния характера протекания процесса

износа инструмента, работающего в сложном (режущее-деформирующем режиме) на параметр шероховатости обработанной поверхности Ra .

Аппроксимируя, представленную на рис. 5 эмпирическую кривую полиномиальной функцией второй степени можно получить уравнение зависимости шероховатости обработанной поверхности Ra , мкм, в процессе технологического износа инструмента, от количества обработанных им участков заготовки N :

$$Ra = 3,4 \cdot 10^{-3} N^2 - 4,34 \cdot 10^{-2} N + 1,3718.$$

И, как следствие, количества деталей-представителей n :

$$Ra = 3 \cdot 10^{-7} n^2 - 4 \cdot 10^{-4} n + 1,3718.$$

При этом коэффициент достоверности аппроксимации R^2 , проводимой по методу наименьших квадратов, для обоих уравнений, описывающих аппроксимирующие кривые, будет равен 0,974, что является очень хорошим показателем.

Таким образом, представленные уравнения, с достаточной степенью точности, отражают динамику влияния характера протекания процесса износа инструмента, работающего в сложном (режущее-деформирующем режиме) на параметр шероховатости обработанной поверхности Ra .

Профилограммы наиболее показательных участков, характеризующих исследуемый (моделируемый) процесс представлены на рис. 6. Таким образом, представленные уравнения, с достаточной степенью точности, отражают динамику влияния характера протекания процесса износа инструмента, работающего в сложном (режущее-деформирующем режиме) на параметр шероховатости обработанной поверхности Ra .

Таким образом, представленные уравнения, с достаточной степенью точности, отражают динамику влияния характера протекания процесса износа инструмента, работающего в сложном (режущее-деформирующем режиме) на параметр шероховатости обработанной поверхности Ra .

Анализируя (в совокупности), сведения, почерпнутые из рис. 5 и рис. 6 можно прийти к

выводу, что изменение величины параметра шероховатости Ra :

– на участках 1 – 4 – следствие протекания периода приработки инструмента (с начальным затуплением его режущей кромки) при котором параметр шероховатости обрабатываемых поверхностей уменьшается;

– на участках 5 – 8 – следствие стабильного износа инструмента без существенного перераспределения (в рамках комбинированной обработки) процессов резания и поверхностного пластического деформирования в пользу последнего, при этом шероховатость растет незначительно;

– на участках 9 – 14 – следствие стабильного износа инструмента с начинающимся ростом скорости перераспределения (в рамках комбинированной обработки) процессов резания и поверхностного пластического деформирования в пользу последнего (эмпирическая кривая изменения шероховатости имеет пологий участок);

– на участках 15 – 17 – следствие стабильного износа инструмента со стабилизацией процесса перераспределения (в рамках комбинированной обработки) процессов резания и поверхностного пластического деформирования (эмпирическая кривая изменения шероховатости также пологая);

– на участке 18 – параметр шероховатости выходит за предел допустимого значения и процесс технологического износа инструмента можно считать завершенным;

– на участках 19 – 30 – следствие динамического изменения параметра шероховатости за счет существенного ускорения износа инструмента по задней поверхности и затупления его режущей кромки, проявляющегося в пагубном росте шероховатости обрабатываемых поверхностей, а на конечных участках обрабатываемой заготовки, появлению задиров и выдавливанию (в область межучастковых канавок) крупных заусенцев (рис. 7). Картина износа инструмента, наблюдаемая на последних участках обрабатываемой им заготовки, соответствует периоду повышенного износа, который для классического инструмента (при условии возможности размерной подналадки), со временем, перешел бы в катастрофический.

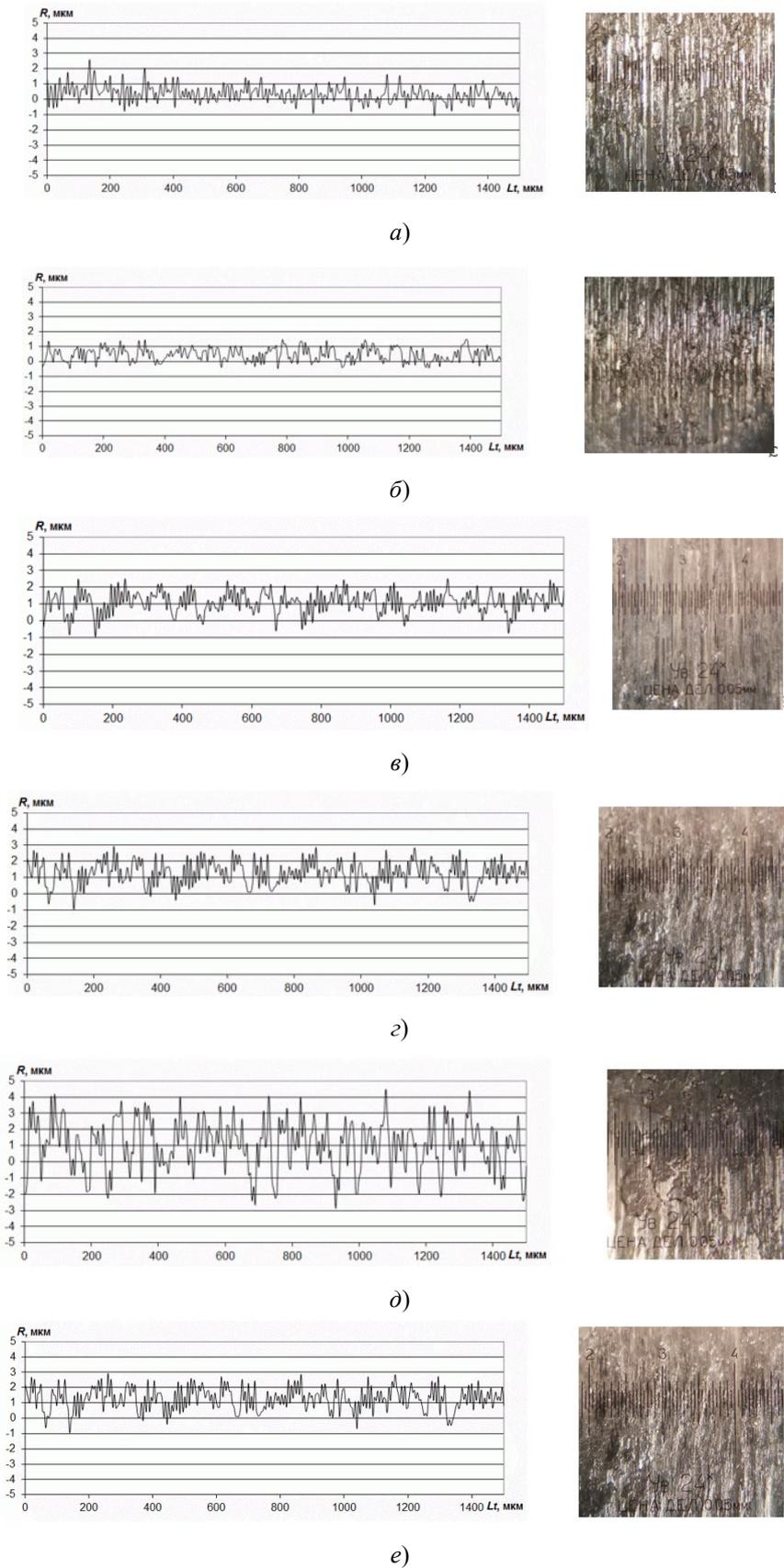
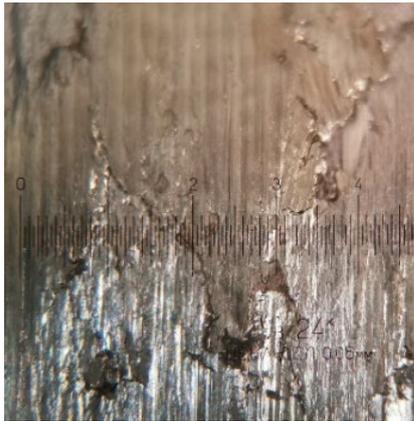


Рис. 6. Профилограммы и увеличенные изображения обработанных поверхностей заготовки:
а – участка № 1; б – участка № 4; в – участка № 9; г – участка № 15; д – участка № 18; е – участка № 30

Fig. 6. Profilograms and enlarged images of the treated surfaces of the workpiece:
a – area № 1; b – area № 4; c – area № 9; d – area № 15; e – area № 18; f – area № 30



a)

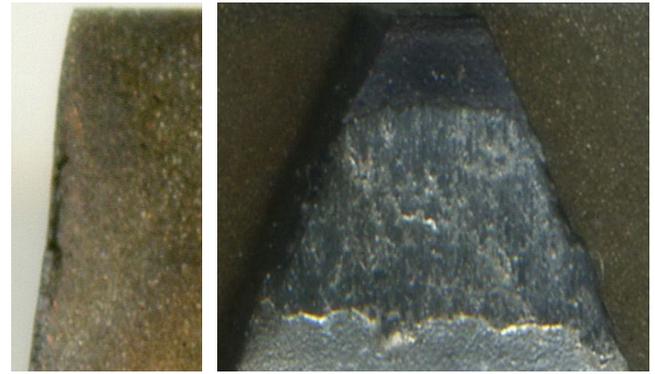


б)

Рис. 7. Увеличенные фотографии задира (*a*) и выдавленного в заусенец металла (*б*), полученные при обработке участка № 30

Fig. 7. Macrophotos of the tear (*a*) and upset metal burr (*b*) obtained during the processing of area № 30

Увеличенные фотографии левой передней поверхности инструмента и задней (эвольвентной) поверхности инструмента представлены на рис. 8. Фотографии сделаны после обработки инструментом тридцати участков экспериментальной заготовки (эквивалент обработки 3240 колес-представителей шевингованием – прикатыванием). На лунке, образованной износом задней поверхности инструмента, четко просматривается дефектная зона, имеющая существенно большую шероховатость (вплоть до задигов), чем не участвовавшая в работе часть поверхности. Это, в свою очередь, сильно повышает шероховатость обработанных поверхностей.



a)

б)

Рис. 8. Увеличенные фотографии, характеризующие состояние: левой передней поверхности инструмента (*a*) и задней поверхности (*б*) по завершении моделирования процесса зубообработки

Fig. 8. Macrophotos characterizing the condition of the left front surface of the tool (*a*) and the back surface (*b*) in completion scenario of gear processing modeling

Образованная на передней поверхности инструмента зона затупления режущей кромки, шириной порядка 0,2 мм, приводит к увеличению доли поверхностного пластического деформирования и уменьшению доли резания в процессе шевингования – прикатывания [5].

Основные выводы и результаты

Таким образом, картина износа инструмента представляется следующей. Преобладающий износ инструмента происходит по задней поверхности ввиду его конструктивной особенности – нулевого заднего угла, усугубляющийся технологической особенностью процесса (шевингования – прикатывания), при которой задняя поверхность участвует в поверхностном пластическом деформировании, сминая слой металла при воздействии существенной нормальной силы, и как следствие, возникающей силы трения между его задней поверхностью и поверхностью обрабатываемой заготовки.

Износ инструмента по передней поверхности, сопровождаемый затуплением его режущей кромки дополнительно ухудшает условия протекания процесса резания (при смене малых припусков порядка 0,02 мм), и увеличивая долю поверхностной пластической деформации (в процессе шевингования – прикатывания). Это, в итоге, повышает долю

материала обрабатываемой заготовки, удаляемую не резанием, а поверхностным пластическим деформированием, тем самым еще сильнее усугубляя износ инструмента по задней поверхности.

Основываясь на данных, приведенных в [8 – 10, 17], можно установить, что для боковых (эвольвентных) поверхностей зубьев рассматриваемого колеса-представителя параметр шероховатости Ra не должен превышать 1,6 мкм. Тогда, опираясь на аналогию, в процессе моделирования обработки партии рассматриваемых ЦЗК, величина допустимого технологического износа инструмента будет достигнута при обработке семнадцати участков экспериментальной заготовки. Иными словами, допустимый ресурс работы инструмента по параметру шероховатости составит 1836 колес-представителей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Борискин О.И., Валиков Е.Н., Белякова В.А.** Комбинированная обработка зубьев цилиндрических зубчатых колес шевингованием – прикатыванием: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. 123 с.
2. **Валиков Е.Н., Белякова В.А.** Режущее-деформирующая чистовая обработка боковых поверхностей зубьев зубчатых колес: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 216 с.
3. **Валиков Е.Н., Борискин О.И., Белякова В.А.** Расчет шевров-прикатников для чистовой обработки зубьев зубчатых колес: учебн. пособие. Тула: изд-во ТулГУ, 2007. 110 с.
4. **Ямников А.С., Маликов А.А., Валиков Е.Н., Сидоркин А.В.** Ресурсосберегающие технологии изготовления цилиндрических зубчатых колес // Технология машиностроения. 2008. № 7. С. 7–10.
5. **Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ямников А.С.** Инновационные технологии обработки зубьев цилиндрических колес: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 335 с.
6. **Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ямников А.С.** Резание и пластическое деформирование при шевинговании-прикатывании цилиндрических колес с круговыми зубьями // СТИН. 2012. №11. С. 17–21.
7. **Маликов А.А., Валиков Е.Н., Ямников А.С.** Специфика профилирования режущих кромок шевера-прикатника // Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. Вып. 1. С. 152–162.
8. **Дунаев П.Ф., Леликов О.П.** Конструирование узлов и деталей машин – 12-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 496 с.
9. **Детали машин:** Атлас конструкций: Учеб. пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов. В2-х ч. Ч. 1/ Б.А Байков, В.И. Богачев, А.В. Буланже и др.; Под общ. ред. Д-ра техн. наук., проф. Д.Н.

Решетова: – 5-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 352 с.

10. **Грязев М.В., Федоров Ю.Н., Артамонов В.Д.** Анализ процессов зубонарезания цилиндрических зубчатых колес: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 384 с.

11. **Маликов А.А., Сидоркин А.В., Васин С.А., Ковалев Ю.В.** Концептуальные основы физического моделирования процесса шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес // СТИН. 2022. № 2. С. 2–7.

12. **Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ковалев Ю.В.** Особенности проектирования инструмента для физического моделирования процесса шевингования – прикатывания цилиндрических зубчатых колес // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 5. С. 8–14.

13. **Ковалев Ю.В.** Улучшенная конструкция экспериментальной заготовки для моделирования процесса шевингования – прикатывания цилиндрических зубчатых колес // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 5. С. 559 – 562.

14. **Профилометр «Hommel-etamic W5»** [Электронный ресурс] // Технические характеристики прибора URL: https://www.geo-ndt.ru/catalog-25-izmeritelisherohovatostiprofilometripofilemeri/hommel_etamic_w5.htm/ (дата обращения 19.03.2024).

15. **Профилометр «Mitutoyo Surftest SJ-301»** [Электронный ресурс] // Технические характеристики прибора URL: <https://www.geo-ndt.ru/pribor-561-profilometr-surfest-sj-301-mitutoyo.htm/> (дата обращения 19.03.2024).

16. **Сидоркин А.В., Ковалев Ю.В., Артамонов В.Д., Маликов Б.А.** Исследование износа инструмента в процессе физического моделирования шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес // СТИН. 2023. № 5. С. 26–32.

17. **Овумян Г.Г., Адам Я.И.** Справочник зубореза. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1983. 223 с.

REFERENCES

1. Boriskin O.I., Valikov E.N., Belyakova V.A. Combined processing of teeth of cylindrical gears by shewing - rolling: monograph. Tula: Tula State University Publishing House, 2007. 123 p.
2. Valikov E.N., Belyakova V.A. Cutting-deforming finishing machining of the side surfaces of gear teeth: monograph. Tula: Tula State University Publishing House, 2011. 216 p.
3. Valikov E.N., Boriskin O.I., Belyakova V.A. Calculation of shaver-rollers for finishing of gear teeth: textbook allowance. Tula: Tula State University Publishing House, 2007. 110 p.
4. Yamnikov A.S., Malikov A.A., Valikov E.N., Sidorkin A.V. Resource-saving technologies for the manufacture of cylindrical gears // Mechanical engineering technology. 2008. No. 7. P. 7–10.
5. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Yamnikov A.S. Innovative technologies for processing the teeth of

cylindrical wheels: monograph. Tula: Tula State University Publishing House, 2011. 335 p.

6. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Yamnikov A.S. Cutting and plastic deformation during shearing and rolling of cylindrical wheels with circular teeth // STIN. 2012. No. 11. pp. 17–21.

7. Malikov A.A., Valikov E.N., Yamnikov A.S. Specifics of profiling the cutting edges of the rolling shaver // News of Tula State University. Technical science. 2008. Vol. 1. pp. 152–162.

8. Dunaev P.F., Lelikov O.P. Design of components and parts of machines - 12th ed., revised. M.: Publishing center «Academy», 2009. 496 p.

9. Machine parts: Atlas of structures: Textbook. a manual for students of mechanical engineering specialties at universities. B2 parts. Part 1/ B.A Baikov, V.I. Bogachev, A.V. Boulanger et al.; Under general ed. Dr. Tech. sc., prof. D.N. Reshetova: – 5th ed. reworked and additional M.: Mechanical Engineering, 1992. 352 p.

10. Gryazev M.V., Fedorov Yu.N., Artamonov V.D. Analysis of gear-cutting processes of cylindrical gears: monograph. Tula: Tula State University Publishing House, 2009. 384 p.

11. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Vasin S.A., Kovalev Yu.V. Conceptual foundations of physical modeling of the process of shaving-rolling cylindrical gears // STIN. 2022. No. 2. P. 2–7.

12. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Kovalev Yu.V. Features of designing a tool for physical modeling of the process of shaving - rolling of cylindrical gears // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. No. 5. pp. 8–14.

13. Kovalev Yu.V. Improved design of an experimental blank for simulating the process of shaving - rolling of cylindrical gears // Izvestia of Tula State University. Technical science. 2023. Issue. 5. pp. 559–562.

14. Profilometer “Hommel-etamic W5” [Electronic resource] // Technical characteristics of the device URL: https://www.geo-ndt.ru/catalog-25-izmeriteli-sherohovavosti-profilometri-profilemeri/hommel_etamic_w5.htm/ (date appeal 03/19/2024).

15. Profilometer «Mitutoyo Surftest SJ-301» [Electronic resource] // Technical characteristics of the device URL: <https://www.geo-ndt.ru/pribor-561-profilometr-surfest-sj-301-mitutoyo.htm/> (access date 03/19/2024).

16. Sidorkin A.V., Kovalev Yu.V., Artamonov V.D., Malikov B.A. Study of tool wear in the process of physical modeling of shaving-rolling of cylindrical gears // STIN. 2023. No. 5. pp. 26–32.

17. Ovumyan G.G., Adam Ya.I. Gear Cutter Handbook. 2nd ed., revised. and additional M.: Mechanical Engineering, 1983. 223 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.03.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 15.03.2024.

The article was submitted 26.03.2024; approved after reviewing 11.03.2024; assepted for publication 15.03.2024.

