

УДК 621.922.025

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗУБОХОНИНГОВАНИЯ ПО МЕТОДУ РОЛИКОВОЙ АНАЛОГИИ

Юрий Сергеевич Багайсков, д-р. техн. наук
Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского
государственного технического университета, г. Волжский
Волгоградской обл., Россия
Тел. +7 902 3130738; E-mail: bagaiskov@bk.ru

Аннотация. Проведено экспериментальное моделирование операции зубохонингования закаленных колес по методу роликовой аналогии с применением машины трения МИ-1М. Радиусы роликов инструмента и детали соответствуют радиусам головки зуба хона и ножки зуба колеса. Обеспечено соответствие скоростей скольжения, нагрузок и пятен контакта в реальном зацеплении. Применялись ролики из абразивно-полимерных композиций различной упругости. Исследования проводились с использованием метода планирования многофакторных экспериментов, центрально-композиционного ротatableного 2-го порядка. Оценивалась степень влияния основных факторов процесса на съем металла, износ инструмента и шероховатость обработанной поверхности. В результате исследований показано, что съем металла существенно увеличивается при повышении скорости, нагрузки и модуля упругости материала инструментов, износ инструментов уменьшается с увеличением твердости и модуля упругости, снижением скорости и нагрузки в зацеплении. Снижение шероховатости поверхности достигается при увеличении скорости, нагрузки, твердости и уменьшении модуля упругости материала инструмента.

Ключевые слова: зубчатый хон, моделирование, ролики, упругая деформации, оптимизация, съем металла, износ хона, шероховатость поверхности.

A STUDY OF GEAR HONING USING THE ROLLER ANALOGY METHOD

Yu. S. Bagaiskov. D. Eng.

Abstract. An experimental simulation of the gear honing process on hardened gears using the roller analogy method was conducted using an MI-1M friction machine. The radii of the tool and workpiece rollers correspond to the radii of the hone tooth head and the root of the gear tooth. The sliding speeds, loads, and contact patches in real gear meshes were matched. Rollers made of abrasive-polymer composites with varying elasticity were used. The study was conducted using a multivariate design experiment (MDDE), including a second-order rotatable center-composite design. The influence of the main process factors on metal removal, tool wear, and machined surface roughness was assessed. The study demonstrated that metal removal significantly increases with increasing speed, load, and elastic modulus of the tool material, while tool wear decreases with increasing hardness and elastic modulus and decreasing speed and load in the mesh. Reduction of surface roughness is achieved by increasing the speed, load, hardness and decreasing the modulus of elasticity of the tool material.

Keywords: toothed hone, modeling, rollers, elastic deformation, optimization, metal removal, hone wear, surface roughness.

Введение. Задачи исследования

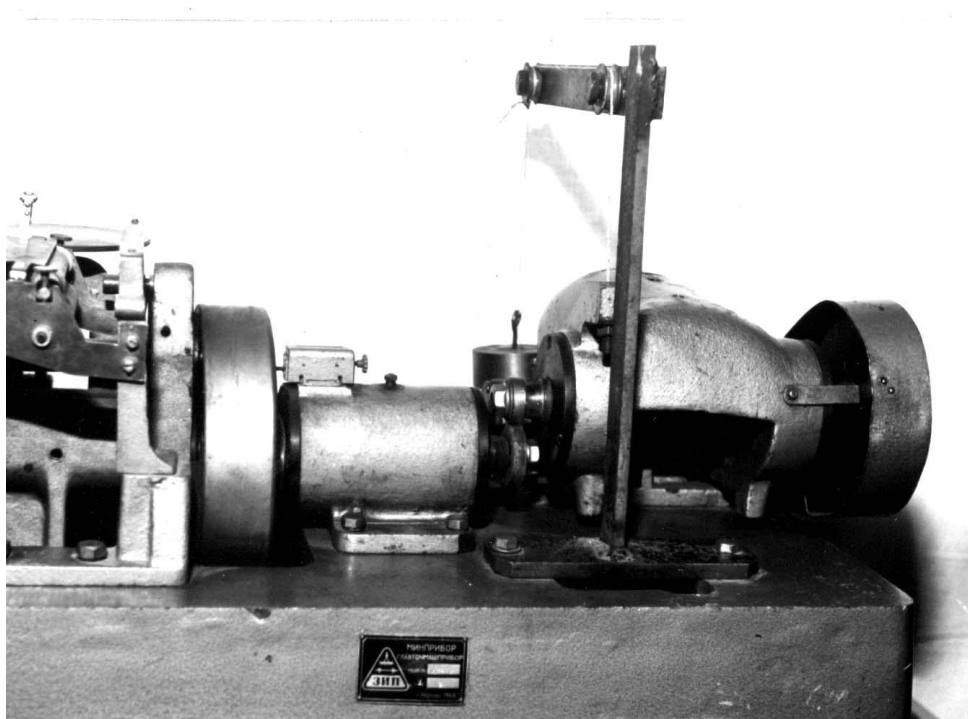
Зубохонингование – операция отделочной обработки боковых поверхностей зубьев закаленных колес абразивным инструментом – зубчатыми хонами, которые изготавливаются с использованием относительно твердых полимерных (эпоксидных, акриловых) и эластичных каучуковых связок на каучуковой основе или эпоксидно-каучуковой основе [1-3]. Зубчатые хоны могут быть как абразивными, так и алмазными. Алмазные хоны имеют алмазосодержащий слой 3-5 мм, чаще всего на металлических связках, в основе которых применение цветных сплавов.

Зубчатый хон по форме выглядит как косозубое колесо, работает по методу обката, с реверсивным вращением и продольной подачей [4, 5]. В качестве оборудования применяются зубохонинговальные станки, в т.ч. отечественного производства.

С целью сокращения объемов экспериментальных работ в производственных условиях непосредственно с инструментом – зубчатыми хонами, проведено моделирование зацепления зубьев хона и обрабатываемого зубчатого колеса по методу «роликовой аналогии» [6]. Роликовая аналогия широко применяется в исследовании работоспособности по различным критериям стальных цилиндрических зубчатых колес [7, 8]. В данном случае одним из роликов является как бы модель зуба абразивного зубчатого хона, второй выполнен из материала обрабатываемых зубчатых колес.

1. Методика исследований

Исследования проводились на установке в виде модернизированной машины трения мод. МИ-1М. На рисунке 1 приведены общий вид и принципиальная схема устройства машины МИ-1М.



а)

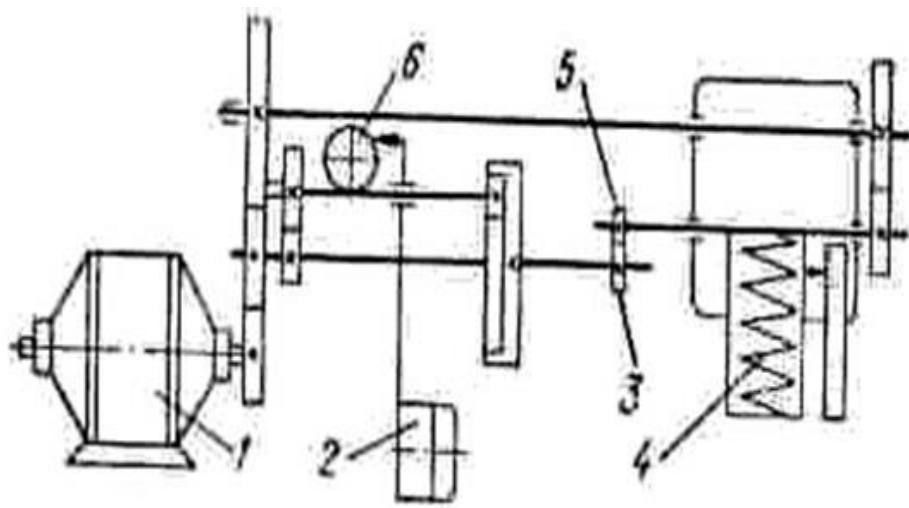


Рисунок 1. Общий вид (а) и схема устройства (б) модернизированной машины трения МИ-1М.



Рисунок 2. Образцы-ролики из материалов абразивных зубчатых хонов и стальных зубчатых колёс

На рисунке 2 показаны в качестве примера образцы-ролики из материалов абразивных зубчатых хонов и стальных зубчатых колёс.

На рисунке 3 показана схема взаимодействия роликов при моделировании зубохонингования. Ролики закреплены на валах установки, вращающихся с различными скоростями V_{1p} и V_{0p} . К режимам резания на установке относится продольная подача S_{np} и нормальная нагрузка P_n на ролики. Обработка велась в присутствии смазочно – охлаждающей жидкости (масло ОСМ-1).

Проводилось исследование на примере создания условий обработки абразивным зубчатым хоном с параметрами: $m = 4,25$ мм, $Z_0 = 53$, $\alpha = 20^\circ$, $\beta_0 = 5^\circ$, $X_0 = 0$, $b_0 = 25$ мм колес с $Z_1 = 27$, $\beta_1 = 0^\circ$, $X_1 = 0$, $v_1 = 20$ мм.

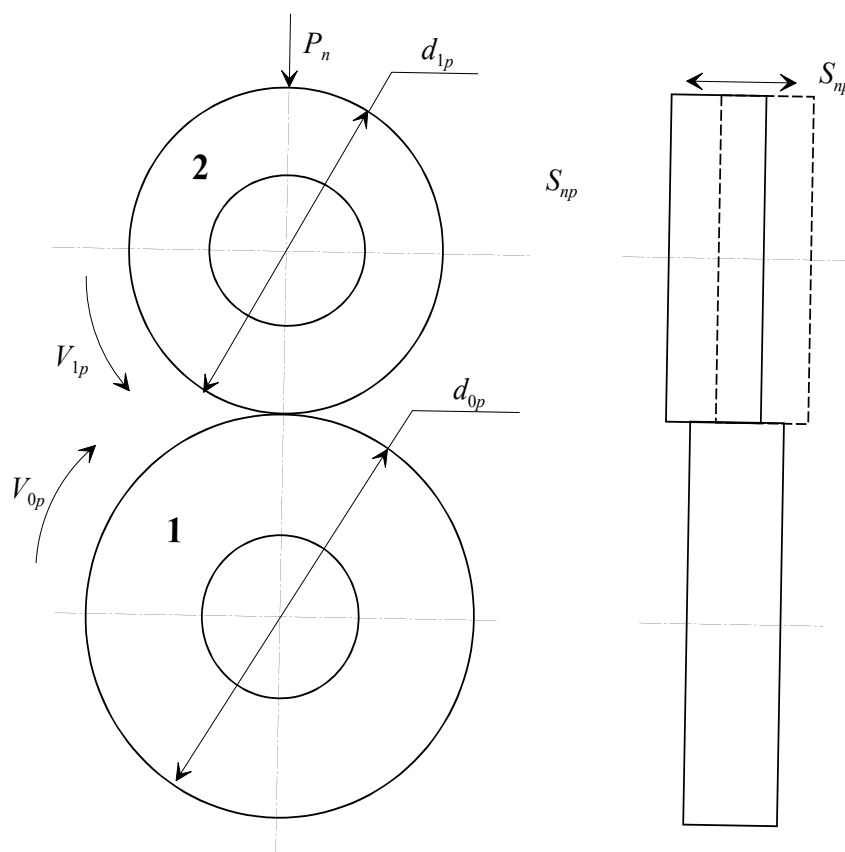


Рисунок 3. Моделирование зубохонингования по методу «роликовой аналогии»: 1 – ролик из материала хона; 2 – ролик из материала зубчатого колеса

Основным условием моделирования явилось соответствие размеров роликов параметрам реального зацепления. При данном моделировании рассматривалось зацепление ножки зуба колеса и головки зуба хона в точке K с углом давления профиля $\alpha_k = 0,3$ рад (рисунок 4). Диаметры роликов d_{1p} и d_{0p} установлены равными удвоенным радиусам кривизны зубьев хона и колеса в этой точке. Для исследуемых параметров хона и колеса принято $d_{0p} = 2\rho_{ок} = 65$ мм, $d_{1p} = 2\rho_{1к} = 50$ мм. Высота роликов принята $\epsilon_p = 15$ мм.

Скорость скольжения роликов V_s принята в соответствии с характером ее изменения в рассматриваемой точке K . Опережающей в скольжении является поверхность ролика-образца детали. За счет разности скоростей роликов происходит снятие металла.

Другим условием моделирования явилось соответствие площади пятна контакта роликов (S_{mod}) фактической в зацеплении зубьев хона и колеса (S). В связи с тем, что площади пятна контакта при $\beta_0 = 0^0$ и $\beta_0 = 5^0$ отличаются всего на 7%, принято допустимым проводить исследования при параллельных осях роликов.

Величина нагрузки на ролики моделировалась, исходя из условия равенства площади пятна контакта роликов и зубьев в реальном зацеплении ($S_{mod} = S$). Так, для исследуемых параметров зацепления хон-колесо при $E_0 = 1800$ МПа и $\alpha_k = 0,3$ рад, площадь пятна контакта зубьев $S = 9,0$ мм².

Площадь пятна контакта роликов определяется по формулам теории упругости для контакта двух цилиндрических поверхностей с характеристиками $E_0 = 1800$ МПа и $E_1 = 2,15 \cdot 10^5$ МПа, $\mu_0 = 0,4$, $\mu_1 = 0,3$:

$$S = 4av, \quad (1)$$

где a и v – полуоси пятна контакта.

$$a = v_p/2; \quad (2)$$

$$v = \sqrt{\frac{P_n (\lambda_1 + \lambda_0) d_{1p} d_{0p}}{2\pi v_p (d_{0p} + d_{1p})}}. \quad (3)$$

$$\lambda_0 = \frac{4(1-\mu_0^2)}{E_0}; \quad \lambda_1 = \frac{4(1-\mu_1^2)}{E_1} \quad (4)$$

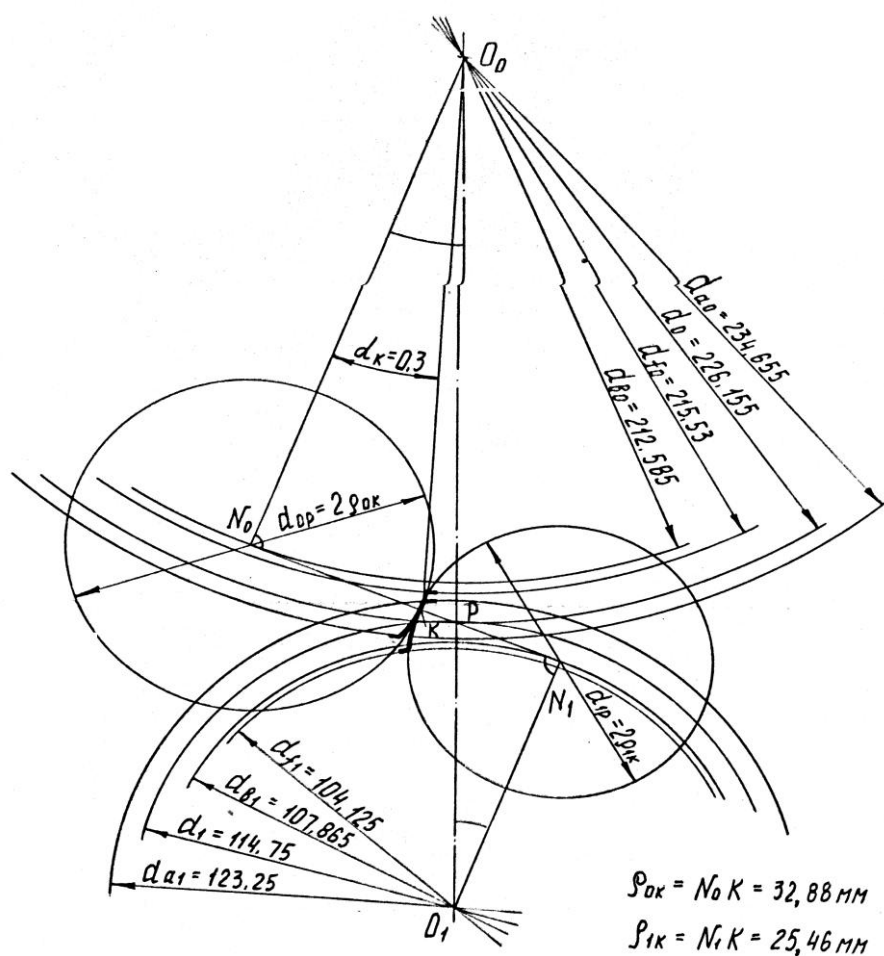


Рисунок 4. Схема к определению диаметров роликов – моделей зубьев хона (d_{0p}) и колеса (d_{1p})

Из формулы (1) с учетом (2) – (4) определена величина силы P_n :

$$P_n = \frac{2S^2(d_{1p} + d_{0p})}{\epsilon_p d_{1p} d_{0p} (\lambda_1 + \lambda_0)}. \quad (5)$$

При $S_{mod} = S = 9 \text{ мм}^2$ $P_n = 204 \text{ Н}$.

Время обработки при моделировании t_{mod} принято, с учетом количества фактических контактов каждого зуба обрабатываемого колеса с поверхностью зубьев хона за цикл зубохонингования $t = 45 \text{ с}$, из следующей зависимости:

$$t_{mod} = t \frac{w_1}{w_{1mod}}, \quad (6)$$

где w_1 и w_{1mod} - угловые скорости детали и ролика-детали; $w_1 = 16,6 \text{ с}^{-1}$ (при $w_0 = 8,35 \text{ с}^{-1}$ и $i = 0,5$), $w_{1mod} = 6,0 \text{ с}^{-1}$ (средняя).

Из формулы (6) время обработки при моделировании $t_{mod} = 125 \text{ с}$.

Ролики-хоны изготовлены из материала различной степени упругости и твердости, в том числе на жесткой (эпоксидно-ацетурной) связке и эластичной каучуковой (гидроксиуретановой) связке [6, 9, 10].

Ролики-детали изготовлены из стали 40Х с твердостью HRC₃ 56 – 62, исходная шероховатость наружной поверхности $R_a = 1,6 - 2,0 \text{ мкм}$. Величина снимаемого слоя металла и износ абразивных роликов измерялись с помощью оптиметра ИКВ с точностью 0,001 мм, шероховатость – с помощью профилографа-профилометра мод. 252 с точностью 0,01 мкм. Каждый опыт повторялся пять раз.

2. Результаты исследований

Исследование влияния различных факторов на эксплуатационные показатели моделей хонов и построение полиномиальных моделей производилось методом планирования экспериментов [6].

Определялись следующие показатели (параметры оптимизации): величина снимаемого слоя металла $C_1(Y_1)$; износ материала инструмента $C_0(Y_2)$; изменение величины шероховатости обработанной поверхности $\Delta R_a(Y_3)$.

Наименования и значения учитываемых в работе факторов приведены в таблице 1 (число факторов $n = 4$). Диапазон величин факторов (V_s , P_n , h_n и E_0) выбран с учетом практики и особенностей моделирования.

Первоначально предполагалось, что исследуемые зависимости линейные, то есть, могут быть аппроксимированы полиномами первой степени:

$$Y = \epsilon_0 + \sum_{i=1}^n \epsilon_i x_i, \quad (7)$$

где $i = 0, 1, \dots, n$; $n = 4$.

Таблица 1. Уровни факторов для планирования полного факторного эксперимента

Наименование	Обозначение	Схема кодирования	Размерность	Интервал варьирования	Уровни факторов		
					нижний уровень «-1»	центральная точка «0»	верхняя точка «+1»
Скорость скольжения V_s	X_1	V_s	м/с	0,24	0,10	0,34	0,58
Сила P_n	X_2	P_n	Н	100	4	104	204
Твердость материала инструмента h_l	X_3	h_l	мм	0,5	1,3	0,8	0,3
Модуль упругости материала инструмента E_0	X_4	$\sqrt{E_0}$ E_0	$\sqrt{\text{МПа}}$ МПа	20,5 -	2,32 5,38	22,37 500	42,42 1800

Разработана матрица планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ) с определенными значениями параметров оптимизации (y_1, y_2, y_3).

Матрица планирования ПФЭ состоит из плана 2^4 (23 опыта). В т.ч. 7 опытов необходимы для расчета дисперсии воспроизводимости $S^2(y)$ и дисперсии коэффициентов регрессии $S^2(b_i)$, оценки значимости коэффициентов по t – критерию Стьюдента. В случае незначимости коэффициентов для оценки адекватности модели по дисперсии адекватности S_{ad}^2 определялся расчетный F – критерий Фишера и сравнивался с табличным. Если $F_p > F_T$, то уравнение считается адекватным. Критерии t и F определялись с вероятностью 95 %.

В исследовании установлено, что линейным является только уравнение $\Delta R_a(y_3)$, так как $F_p = 0,409$, что меньше $F_T = 4,1$. Остальные уравнения неадекватны результатам эксперимента, в них оказались значимыми коэффициенты при парных взаимодействиях.

Уравнение ΔR_a получилось в следующем виде:

$$\Delta R_a = y_3 = 0,95 + 0,144 V_s + 0,081 P_n + 0,109 h_l - 0,334 E_0^{1/2}. \quad (8)$$

Определение зависимостей C_1 и C_0 от V_s , P_n , h_l и E_0 далее производилось с помощью метода планирования по центрально-композиционному ротатабельному факторному эксперименту (ЦКРФЭ) второго порядка [6]:

$$Y = \epsilon_0 + \sum_{i=1}^n \epsilon_i X_i + \sum_{i,j=1}^n \epsilon_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n \epsilon_{ii} X_i^2, \quad (9)$$

где ϵ_{ij} – коэффициенты при парных взаимодействиях; ϵ_{ii} – коэффициенты при квадратичных взаимодействиях.

Уровни факторов для ЦКРФЭ приведены в таблице 2, разработана матрица планирования. Получены результаты эксперимента Y_1 и Y_2 . План ЦКРФЭ второго порядка для четырех факторов состоит из 16 основных опытов, 8 – в «звездных» точках и 7 в центре плана. Величина «звездного» плеча в данном случае $\pm \alpha = 2^{4/4} = \pm 2,0$. В матрице планирования есть также 6 парных (0, -1 и 1) и 4 квадратичных (0, 1, 4) взаимодействий. Всего в уравнения входит, с учетом свободного члена, 15 коэффициентов.

Таблица 2. Уровни факторов для планирования центрально-композиционного ротационного эксперимента

Факторы		Схема кодирования	Размерность	Интервал варьирования	Уровни факторов				
Наименование	Обозначение				«звездная» точка «-2,0»	нижний уровень «-1»	центральная точка «0»	верхний уровень «+1»	«звездная» точка «+2, 0»
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Скорость скольжения V_s	X_1	V_s	м/с	0,12	0,10	0,22	0,34	0,46	0,56
Сила P_n	X_2	P_n	Н	50	4	54	104	154	204
Твердость материала инструмента h_l	X_3	h_l	мм	0,25	1,3	1,05	0,8	0,55	0,3
Модуль упругости материала инструмента E_0	X_4	$\sqrt{E_0}$ E_0	$\sqrt{\text{МПа}}$ МПа	10,25 -	2,32 5,38 МПа	12,12 146,9	22,37 500	32,63 1064	42,42 1800

Определены значения коэффициентов регрессии, произведены оценки их значимости по t – критерию и адекватности полученных полиномиальных моделей результатам эксперимента по F – критерию. С учетом значимых коэффициентов регрессии полученные зависимости величины снимаемого металла (C_1) и износа инструмента (C_0) имели следующий вид:

$$C_1 = V_1 = 8,026 + 1,43V_s + 2,3P_n + 2,43E_0^{1/2} + 0,794P_nE_0^{1/2}; \quad (10)$$

$$C_0 = V_2 = 2,52 + 0,55V_s + 1,097P_n - 0,646h_n - 0,52E_0^{1/2} + 0,419V_sP_n. \quad (11)$$

Данные уравнения являются адекватными с вероятностью 95 % ($F_p = 2,96$ и $2,4$ соответственно при $F_T = 3,2$).

3. Анализ результатов

Анализ уравнений (10), (11) и (8) показал, что величина снимаемого слоя металла при моделировании на роликах увеличивается с повышением скорости резания V_s , силы P_n и модуля упругости материала E_0 . Влияние твердости материала незначительно, в то же время значимо взаимодействие P_n и E_0 . Износ материала инструмента уменьшается с увеличением его твердости и модуля упругости, уменьшением V_s и P_n . Таким образом, экспериментально подтверждено теоретическое положение о возможности снижения величины слоя металла, снимаемого с заготовок колес, и повышения износа хонеров при уменьшении модуля упругости их материала, вследствие увеличения подвижности абразивных зерен, закрепленных связкой в направлении нормальном и тангенциальном обрабатываемой поверхности.

Наибольший эффект снижения шероховатости обработанной поверхности достигнут при увеличении V_s , твердости материала и, в меньшей степени, P_n , и уменьшении E_0 . При этом влияние модуля упругости является преобладающим.

В целом полученные в результате экспериментального моделирования зубохонингования зависимости величины снимаемого слоя металла, износа материала хона и снижения шероховатости поверхности после обработки по учитываемым факторам дополняют и подтверждают зависимости, установленные при аналитическом моделировании по удельным скольжениям и размерам пятна контакта зубьев хона и колеса, а также результаты натурных испытаний зубчатых хонеров [6].

Заключение

Подтверждается возможность и эффективность экспериментального моделирования зубохонингования для получения зависимости величины снимаемого слоя металла, износа материала хона и изменения шероховатости поверхности после обработки по учитываемым факторам. Такое моделирование по сравнению с натурными испытаниями зубчатых хонеров позволяет значительно расширить диапазон исследуемых рецептурных характеристик хонеров и ускорить процесс исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гаршин А. П., Федотова С. М. Абразивные материалы и инструменты. Технология производства: Учеб. пособие / Под общ. ред. проф. А. П. Гаршина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 1010 с.
2. Маликов А. А., Сидоркин А. В. Особенности конструкции алмазного зубчатого хона для обработки цилиндрических зубчатых колес // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2009. – № 2-2. – С. 176-180. – EDN LADZAP
3. Калашников А. С., Моргунов Ю. А., Калашников П. А. Особенности технологии зубохонингования цилиндрических колес // Справочник. Инженерный журнал. 2014. № 6(207). С. 3-9. DOI 10.14489/hb.2014.06. pp.003-009.

4. Спирин В. А., Макаров В. Ф., Халтурин О. А. Производительность глобоидно-го зубохонингования // Научные технологии в машиностроении, 2020. № 3. - С.24-29.
5. Патент 2860784. Российская Федерация. В24d/ Зубчатый хон/ В. А. Носенко, А. Е. Мироседи, Е. И. Мироседи, Ю.С. Багайсков, ПО «Редуктор», Пермь, 2025.
6. Багайсков Ю. С., Шумячер В. М. Повышение эксплуатационных показателей изделий из абразивных композиционных материалов: (монография). Волгоград: ВолГАСУ, ВИСТех (фил.) ВолГАСУ, 2005. - 200с.
7. Уткин В. С. Определение надежности зуба прямозубой передачи по условию контактной усталости // Вестник машиностроения, -2017.- № 3. – С.25-28.
8. Жукова С. И. Разработка метода технологического обеспечения противозадирной стойкости в кромочной зоне контактирования эвольвентных цилиндрических зубчатых колес редукторов газотурбинных двигателей. Специальность 05.02. 08. Диссертация на соиск. степени канд. техн. наук. Рыбинск, 2018.
9. Багайсков Ю. С. Исследование суммарной упругой деформации зубьев абразивных шевров // Фундаментальные основы механики: материалы междунар. н.-пр. конф.-Новокузнецк: НИЦ МС, № 3, 2018. - С.92- 96.
10. Эластичные хоны для полирования профилей зубьев термообработанных цилиндрических колес специального назначения (Elastic hones for polishing tooth profiles of heat-treated spur wheels for special applications) / В. А. Носенко, Ю. С. Багайсков, А. Е. Мироседи, А. С. Горбунов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты) (Obработка metallov). - 2024. - Т. 26, № 1. - С. 66-79. - DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-66-79.

REFERENCES

1. Garshin A. P., Fedotova S. M. Abrasive Materials and Tools. Production Technology: Textbook / Under the general editorship of prof. A. P. Garshin. – St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2008. – 1010 p.
2. Malikov A. A., Sidorkin A. V. Design Features of a Diamond Tooth Hone for Machining Cylindrical Gears // Bulletin of Tula State University. Technical Sciences. – 2009. – № 2-2. – Pp. 176-180. – EDN LADZAP
3. Kalashnikov A. S., Morgunov Yu. A., Kalashnikov P. A. Features of Gear Honing Technology for Cylindrical Gears // Handbook. Engineering Journal. 2014. No. 6(207). P. 3-9. DOI 10.14489/hb.2014.06. pp.003-009.
4. Spirin V. A., Makarov V. F., Khalturin O. A. Globoid Gear Honing Performance // Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering, 2020. No. 3.-P.24-29.
5. Patent 2860784. Russian Federation. B24d/ Gear Honing / V. A. Nosenko, A. E. Miroseidi, E. I. Miroseidi, Yu. S. Bagayskov, PO "Reductor", Perm, 2025.
6. Bagayskov Yu. S., Shumyacher V. M. Improving the Performance of Products Made of Abrasive Composite Materials: (monograph). Volgograd: VolgGASU, VISTech (branch) of VolgGASU, 2005. - 200 p.
7. Utkin V. S. Determination of the reliability of a spur gear tooth based on the contact fatigue condition // Bulletin of Mechanical Engineering, -2017.- No. 3. - P. 25-28.
8. Zhukova S. I. Development of a method for technological provision of anti-scuff resistance in the edge contact zone of involute cylindrical gears of gas-turbine engine reducers. Specialty 05.02. 08. Dissertation for the degree of Cand. Sci. (Eng.). Rybinsk, 2018.

9. Bagayskov Yu. S. Study of the total elastic deformation of abrasive shavers teeth // Fundamental foundations of mechanics: proc. conf.-Novokuznetsk: NIC MS, No. 3, 2018. - P.92-96.
10. Elastic hones for polishing tooth profiles of heat-treated spur wheels for special applications / V. A. Nosenko, Yu. S. Bagayskov, A. E. Mirosedi, A. S. Gorbunov // Metal processing (technology, equipment, tools) (Obrabotka metallov). - 2024. - Vol. 26, No. 1. - P. 66-79. - DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.1-66-79.

Статья поступила в редакцию 03.02.2026; одобрена после рецензирования 13.02.2026; принята к публикации 25.02.2026

The article was submitted February 3, 2026; approved after reviewing February 13, 2026; accepted for publication February 25, 2026.