УДК 621.833

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН ПРИ ИХ ШЛИФОВАНИИ КОНИЧЕСКИМ ДВУСТОРОННИМ И ЧЕРВЯЧНЫМ КРУГАМИ

Докт. техн. наук, проф. КАНЕ М. М.,
канд. техн. наук, доц. МЕДВЕДЕВ А. И., канд. техн. наук ИВАНОВ Б. В.

Белорусский национальный технический университет

Операция зубошлифования является достаточно распространенным методом обработки зубьев цилиндрических шестерен, обеспечивающим 3–6-ю степени точности их поверхностей по ГОСТ 1643–81.

Обработка деталей коническим двусторонним кругом производилась на станках моделей 5М841, 5843 и 5831. Особенность этих станков – большая универсальность, простота обслуживания и профилирования шлифовального круга, возможность обработки зубчатых колес с большим диаметром и модулем. Производительность их ниже, чем станков с профильным кругом, но точность обработки выше. Распространенность данного метода обработки на предприятиях объясняется их простотой и дешевизной по сравнению со станками, работающими тарельчатыми и червячными кругами.

Обработка червячным кругом производилась на станках моделей 5D883, AZO, AZA, NZA (Рейсхауэр) по методу обкатки, перед чистовыми рабочими ходами автоматически осуществлялось осевое перемещение круга. Точность обработки на этих станках достигает 3–4-й степеней по ГОСТ 1643–81, параметр шероховатости обработанной поверхности Ra = = 0,32–0,63 мкм. Данным методом обрабатывают шестерни с $m \leq 8$ мм. В нашей работе использовались червячные и конические двусторонние шлифовальные круги из электрокорунда белого 24А зернистостью 12–25, твердостью СМ1–М3.

Исследовались параметры шероховатости Ra, микротвердости H_μ, значения и знак остаточных напряжений 1-го и 2-го родов (σ_1 и σ_2) в поверхностном слое зубьев шестерен до и после зубошлифования.

Эти показатели существенно влияют на эксплуатационные свойства зубчатых колес, в частности шероховатость и микротвердость поверхности зубьев – на контактную и усталостную прочность и выносливость, а шероховатость поверхности зубьев – на коэффициент трения между зубьями. Остаточные напряжения оказывают влияние на контактную прочность и прочность зубьев при изгибе [1].

В настоящее время данный вопрос мало изучен, что подтверждает актуальность наших исследований. В действующих технологических процессах значения твердости поверхности зубьев после зубошлифования указываются такими же, как и после химико-термической обработки (ХТО), а величины остаточных напряжений вообще не нормируются.

Исследования выполнялись в производственных условиях МАЗ и МЗШ, а рентгеновские исследования остаточных напряжений – в Физико-техническом институте НАН Беларуси.

Объектами исследования являлись шестерни коробки перемены передач тракторов МТЗ и автомобилей МАЗ со следующими параметрами:

1) шестерня 1522–2407122, m = 6,5 мм, z = = 56, материал – сталь 25ХГТ;

2) шестерня 260–1005030, m = 2,5 мм, z = 27, $\beta = 28°68'$, материал – сталь 25ХГТ;

3) шестерня 5336–2405028А, m = 4,5 мм, z = = 21, материал – сталь 20ХН3А;

4) шестерня 5336–2405035А, m = 4,5 мм, z = = 15, материал – сталь 20ХН3А.

Для каждого материала было обработано и измерено две-четыре партии шестерен.

Измерение указанных выше параметров осуществлялось на четырех диаметрально расположенных зубьях шестерен. Партия деталей составляла 15 шт., а количество замеров – 60.

Все детали партии были промаркированы, ХТО выполнялась в одном безмуфельном агрегате, а зубошлифование – на одном станке при неизменных режимах обработки. Этим обеспечивалась сопоставимость результатов опытов.

Для проведения исследований была предложена методика, основными особенностями которой являлось:

1) использование методов однофакторной математической статистики, в частности методов однофакторного регрессионного и корреляционного анализа, которые позволяют установить форму и степень тесноты взаимодействия между парами факторов в реальных условиях [2];

2) получение информации об исследованных процессах с помощью пассивного эксперимента, в наилучшей степени обеспечивающего соответствие природы эксперимента исследуемому процессу и позволяющего использовать полученную с его помощью модель этого процесса в реальных условиях его выполнения.

При исследовании формы взаимосвязи значений исследованных показателей качества поверхности зубьев после зубошлифования $(\bar{y})$ с их исходными значениями $(\bar{x})$ были рассмотрены две зависимости:

$$\bar{y} = a + b\bar{x}; \qquad (1)$$

$$\bar{y} = c + d\bar{x} + e\bar{x}^2, \qquad (2)$$

где a, b, c, d и e – постоянные коэффициенты.

Для оценки формы взаимосвязи $\bar{y} = f(\bar{x})$ исследовали эмпирические линии регрессии (рис. 1), выполняли анализ ряда характеристик, рассчитывали значения следующих показателей для зависимостей (1) и (2): остаточную сумму квадратов S, критерий Фишера F адекватности модели, среднюю относительную ошибку $\varepsilon_{ср}$ уравнения связи, критерий Стьюдента t для оценки достоверности значений коэффициентов b, e, d в (1) и (2).

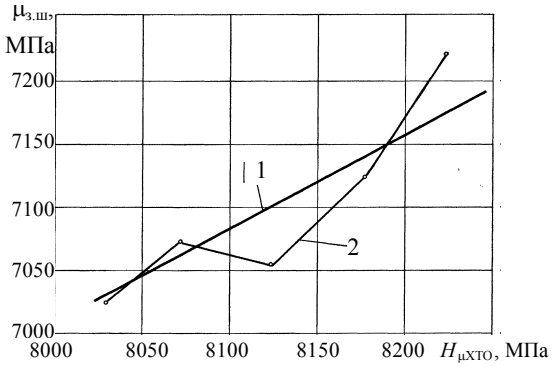

Рис. 1. График взаимосвязи величин $H_μ$ после зубошлифования с их исходными значениями после ХТО (сталь 25ХГТ): 1 – теоретическая $(\bar{y} = 2538 + 0{,}57\,\bar{x})$; 2 – эмпирическая линии регрессии

Если для рассматриваемой зависимости соблюдалось условие $F < F_{табл}$ (для данных условий в большинстве случаев $F_{табл}$ = 1,65), то гипотезу адекватности принимали.

Оценка степени тесноты взаимосвязи исследованных показателей качества после зубошлифования с их исходными значениями проверялась на основе расчета коэффициента корреляции r_{xy} между указанными значениями, теоретических $\eta_т$ и эмпирических $\eta_э$ корреляционных отношений.

Существенность в различии между $\eta_э$ и $\eta_т$, а также $\eta_т$ и r_{xy} оценивали с помощью критерия Романовского [2]. Наши расчеты показали несущественные различия между указанными характеристиками для всех исследованных параметров качества и условий обработки, что является одним из доказательств линейного характера рассматриваемых зависимостей. Значимость величин r_{xy} проверяли с помощью критерия Стьюдента t. При $t \geq 2{,}6$ достоверность оцениваемых с его помощью значений гарантируется с вероятностью $P \geq 0{,}99$.

Определение фактической вариативности исследованных показателей до и после зубошлифования выполнено с помощью среднего квадратического отклонения σ_x и σ_y каждого показателя соответственно. Нами установлено, что распределение исследованных показателей подчиняется нормальному закону. Поэтому,

определив экспериментально значения σ_x и σ_y,
можно принять предельное поле рассеяния рассмотренных параметров x и y как $6\sigma_x$ и $6\sigma_y$ при 0,27%-м уровне значимости [3]. Для оценки возможной степени изменения каждого из рассмотренных параметров качества поверхностей зубьев в процессе зубошлифования были рассчитаны коэффициенты уточнения

$$V = \frac{\bar{x}}{\bar{y}}, \qquad (3)$$

где $\bar{x}$, $\bar{y}$ – средние арифметические значения данного показателя качества до и после зубошлифования.

Для установления общих закономерностей образования погрешности исследованных показателей на операции зубошлифования выполнено разложение их общей дисперсии после данной обработки σ_y^2 на δ_{yx}^2, характеризующей влияние исходных погрешностей (в данном случае после ХТО), и σ_{yx}^2, характеризующей влияние погрешностей самого процесса зубошлифования, т. е.

$$\sigma_y^2 = \delta_{yx}^2 + \sigma_{yx}^2 = b^2\sigma_x^2 + \sigma_y^2(1 - r_{xy}^2). \qquad (4)$$

Были определены части общей дисперсии результирующей погрешности, одна из которых возникает на самой операции зубошлифования (A), а другая – перенесена с предыдущей операции (B):

$$A = \frac{\sigma_{yx}^2}{\sigma_y^2} \cdot 100; \qquad (5)$$

$$B = \frac{\delta_{yx}^2}{\sigma_y^2} \cdot 100. \qquad (6)$$

Основные результаты выполненных исследований, а также усредненные значения характеристик взаимосвязей $y = f(x)$ для данных экспериментов приведены в табл. 1.

Значения a, b, $\varepsilon_{ср}$ и F даны для зависимостей между значениями различных показателей качества до и после зубошлифования, описываемых (1). Так как для зависимости вида (1) значения $\varepsilon_{ср}$ = 6,1–18,7; S, F, t находятся в допускаемых пределах, то (1) является предпочтительнее зависимости (2), требующей более трудоемких расчетов при ее установлении и использовании.

В (1) значения a характеризуют часть средней арифметической величины каждого из рассмотренных показателей, возникающей на самой операции зубошлифования. Наименьшая величина a характеризует максимально допустимое среднее значение соответствующего показателя качества после зубошлифования при условии пренебрежения исходными погрешностями, т. е. позволяет оценить точностные возможности станочной системы на данной операции.

Величины b показывают, какая часть среднего исходного значения данного параметра переносится на его среднюю величину после зубошлифования. Чем больше b, тем в меньшей степени при зубошлифовании происходит качественное изменение исходного набора значений того или иного показателя при данной операции.

Оценку возможных пределов такого количественного изменения этих показателей позволяет дать значение V.

Величины $\eta_т$, $\eta_э$ и r_{xy} прямо пропорциональны соответствующим значениям b и обратно пропорциональны V. Это следует из формулы

$$b = r_{xy}\frac{\sigma_y}{\sigma_x}. \qquad (7)$$

Наиболее тесная связь с исходными значениями наблюдается (табл. 1) у параметров $H_μ$ и σ_2, абсолютные величины которых при зубошлифовании изменяются в наименьшей степени, а менее тесная взаимосвязь – у показателей Ra и σ_1, абсолютные значения которых в процессе зубошлифования изменяются значительно.

С помощью величин A и B можно оценить, какая доля дисперсии того или иного показателя возникает на самой операции зубошлифования, а какая переносится с предыдущей операции. Чем меньше степень изменения абсо-

лютного значения того или иного показателя в процессе зубошлифования (V), тем большая доля его дисперсии (B) наследуется с предыдущей операции (ХТО), и наоборот. Информация о значениях A и B для данного параметра качества поверхности позволяет наметить наиболее рациональные пути управления изучаемым процессом для достижения необходимых значений указанного параметра.

Таблица 1

Значения основных статистических характеристик изменений исследованных параметров качества поверхностей зубьев цилиндрических шестерен при их шлифовании различными методами

Материал зубчатых колес	Операции обработки (предшествующая и рассматриваемая)	Основные статистические характеристики														
		$\bar{x}$	$\bar{y}$	S_x	S_y	$V=\frac{\bar{x}}{\bar{y}}$	a	b	$\eta_э$	$\eta_т$	r_{xy}	t_r	$\varepsilon_{ср}$	F	A, % (шлиф.)	B, % (ХТО)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$H_μ$, МПа																
25ХГТ	ХТО – зубошлифование коническим кругом	8250	7240	1375	1206	1,14	2538	0,57	0,68	0,66	0,65	9,5	7,1	0,82	58,0	42,0
	ХТО – зубошлифование червячным кругом	8190	7185	1365	1198	1,14	2680	0,54	0,66	0,64	0,62	9,4	6,1	0,79	62,0	38,0
20ХН3А	ХТО – зубошлифование коническим кругом	7700	7000	1283	1167	1,10	2150	0,63	0,85	0,80	0,69	11,2	8,9	0,85	51,0	49,0
	ХТО – зубошлифование червячным кругом	7692	6986	1282	1164	1,15	2370	0,60	0,82	0,75	0,66	11,0	8,5	0,81	56,0	44,0
Ra, мкм																
25ХГТ	ХТО – зубошлифование коническим кругом	3,0	1,3	0,50	0,20	2,50	0,88	0,14	0,42	0,40	0,35	9,70	11,3	0,80	87,5	12,5
	ХТО – зубошлифование червячным кругом	2,98	1,3	0,50	0,20	2,50	0,91	0,13	0,45	0,52	0,32	10,80	11,6	0,70	90,0	10,0
20ХН3А	ХТО – зубошлифование коническим кругом	1,35	0,8	0,22	0,13	1,68	0,48	0,24	0,49	0,42	0,40	11,50	12,5	0,75	82,0	18,0
	ХТО – зубошлифование червячным кругом	1,25	0,8	0,20	0,13	1,56	0,51	0,23	0,41	0,39	0,36	10,10	11,5	0,90	87,0	13,0
σ_1, МПа																
25ХГТ	ХТО – зубошлифование коническим кругом	–840	1300	–140,0	216,7	–0,65	552	–0,89	0,64	0,61	0,58	4,25	12,5	0,86	66,0	34,0
	ХТО – зубошлифование червячным кругом	–845	1298	–141,0	216,3	–0,65	622	–0,80	0,58	0,60	0,53	4,50	10,5	0,80	72,0	28,0
20ХН3А	ХТО – зубошлифование коническим кругом	–944	1542	–156,0	257,0	–0,60	600	–0,98	0,66	0,63	0,60	4,60	11,6	0,77	64,0	36,0
	ХТО – зубошлифование червячным кругом	–949	1522	–158,2	253,7	–0,62	687	–0,88	0,71	0,65	0,55	4,80	8,6	0,85	70,0	30,0
σ_2, МПа																
25ХГТ	ХТО – зубошлифование коническим кругом	560	750	93,3	125,0	0,75	263	0,87	0,65	0,68	0,65	5,8	18,7	0,95	58,0	42,0
	ХТО – зубошлифование червячным кругом	544	742	90,7	123,7	0,73	296	0,82	0,65	0,64	0,60	5,2	10,8	0,80	64,0	36,0
20ХН3А	ХТО – зубошлифование коническим кругом	580	730	96,6	121,7	0,79	278	0,78	0,68	0,65	0,62	8,5	18,5	0,93	57,0	43,0

	ХТО – зубошлифование червячным кругом	582	748	97	124,7	0,78	312	0,75	0,64	0,61	0,58	4,3	12,5	0,85	66,0	34,0

В Ы В О Д Ы

1. При зубошлифовании происходит снижение микротвердости поверхности зубьев на 700–1000 МПа, уменьшение параметра шероховатости *Ra* с 3,0 до 0,8 мкм для обоих исследованных материалов и методов зубошлифования.

2. Остаточные напряжения 1-го рода σ_1 из сжимающих порядка 800–950 МПа переходят в растягивающие в пределах 1300–1550 МПа, а напряжения 2-го рода σ_2 увеличиваются в среднем в 1,3 раза. Такой характер изменения твердости и остаточных напряжений неблагоприятно влияет на прочность зубьев шестерен.

3. Зубошлифование червячным кругом в большей степени влияет на качественное изменение рассмотренных параметров, чем зубошлифование коническим кругом. При зубошлифовании червячным кругом это подтверждается уменьшением значений *B*: для параметра H_μ – на 8–10 %, для *Ra* – на 18–20 %, для σ_1 – на 17–19 % и для σ_2 – на 14–20 % по сравнению со шлифованием коническим кругом. Примерно в такой же степени при данных процессах имеет место и увеличение значений r_{xy}.

4. Изменение абсолютных значений рассмотренных параметров качества поверхностей зубьев (характеристика *V*) при зубошлифовании червячным кругом по сравнению с коническим кругом примерно одинаково.

5. Отмечено несколько более интенсивное качественное и количественное изменение рассмотренных параметров при зубошлифовании обоими методами шестерен из стали 25ХГТ по сравнению с шестернями из стали 20ХН3А (примерно на 4–30 % для различных параметров).

6. Полученные данные позволяют моделировать изменения параметров качества поверхностей зубьев шестерен при зубошлифовании различными методами, дают объективные характеристики этой операции для различных обрабатываемых материалов и способов ее реализации, позволяют выполнять как прогнозирование возможностей процесса зубошлифования, так и оптимизацию требований к исходным значениям качества поверхности зубьев перед зубошлифованием.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Производство** зубчатых колес / под ред. Б. А. Тайца. – М.: Машиностроение, 1990. – 463 с.

2. **Соломин, И. С.** Математическая статистика в технологии машиностроения / И. С. Соломин. – М.: Машиностроение, 1972. – 215 с.

3. **Кане, М. М.** Статистический анализ изменения параметров точности цилиндрических зубчатых колес при шевинговании / М. М. Кане // Вестник машиностроения. – 1990. – № 5. – С. 24–27.

Поступила 27.06.2011

УДК 629.7.01

СОЗДАНИЕ РОБОТА-САПЕРА ПОВЫШЕННОЙ ЖИВУЧЕСТИ И ПРОХОДИМОСТИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРЕДМЕТОВ

Канд. техн. наук МИРОНОВ Д. Н., асп. ЕВДОКИМОВ Д. А.

Белорусский национальный технический университет

В связи с трагическими событиями, произошедшими в Минске 3 июля и в метро, возникает необходимость в изготовлении устройств, позволяющих обнаруживать, обезвреживать или транспортировать взрывоопасные предметы в безопасные места, не подвергая опасности жизни людей. Одним из таких устройств является робот-сапер.