

**ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН ПРИ ИХ ШЛИФОВАНИИ КОНИЧЕСКИМ ДВУХСТОРОННИМ КРУГОМ***Белорусский национальный технический университет**Минск, Беларусь*

*Приведены результаты экспериментального изучения изменения микротвердости, шероховатости и остаточных напряжений 1 и 2 родов в поверхности зубьев цилиндрических шестерен ( $m = 4-6,5$  мм,  $z = 21-56$ ) при их шлифовании коническим двухсторонним кругом. Установлены основные закономерности указанных процессов для различных марок легированных сталей.*

Операция зубошлифования коническим 2-х сторонним кругом является достаточно распространенным методом обработки зубьев цилиндрических шестерен, обеспечивающим 5 – 6 степени точности их поверхностей по ГОСТ 1643–81.

Обработка деталей производилась на станках моделей 5М841 и 5843. 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.

Исследовались шероховатость ( $R_a$ ), микротвердость ( $H_{\mu}$ ), значения и знак остаточных напряжений 1-го и 2-го родов ( $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ) в поверхностном слое зубьев шестерен.

Эти показатели существенно влияют на эксплуатационные свойства зубчатых колес. В частности, шероховатость и микротвердость поверхности зубьев влияют 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.

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 приводятся.

Исследования выполнялись в производственных условиях МАЗа и МЗШ, а рентгеновские исследования остаточных напряжений производились в Физико-техническом институте АНБ.

Объектами исследования являлись шестерни коробки перемены передач трактора МТЗ и автомобиля МАЗ со следующими параметрами:

1. Шестерня 1522–2407122,  $m = 6,5$  мм,  $z = 56$ , материал детали – сталь 25ХГТ;
2. Шестерня 5336–2405028А,  $m = 4,5$  мм,  $z = 21$ , материал детали – сталь 20ХНЗА.

Измерение вышеуказанных параметров осуществлялось на 4-х диаметрально расположенных зубьях шестерен. Партия деталей составляла 15 штук, 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. Получение информации об исследованных процессах с помощью пассивного эксперимента в наилучшей степени обеспечивающего соответствие природы эксперимента исследуемому процессу и позволяющему использовать полученную с его помощью модель этого процесса в реальных условиях его выполнения.

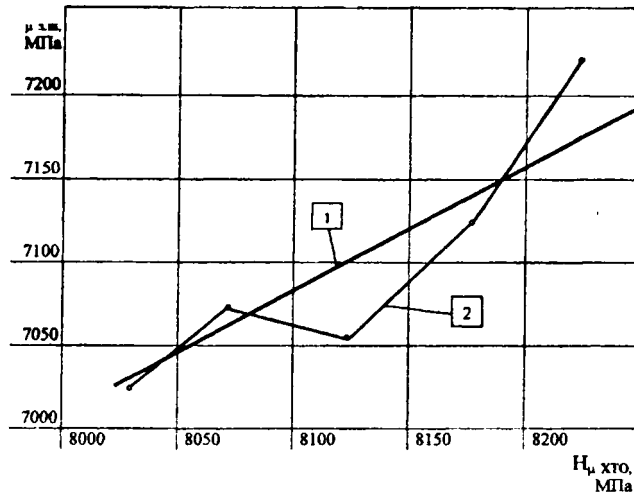
При исследовании формы взаимосвязи значений исследованных показателей качества поверхности зубьев после зубошлифования ( $\bar{y}$ ) с их исходными значениями ( $\bar{x}$ ) были рассмотрены две зависимости:

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

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

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

Для оценки формы взаимосвязи  $\bar{y} = f(\bar{x})$  были рассмотрены эмпирические линии регрессии (см. рисунок 1) и выполнен анализ ряда характеристик.



1 – теоретическая линия регрессии ( $\bar{y} = 2538 + 0,57\bar{x}$ ); 2 – эмпирическая линия регрессии

Рис. 1. – График взаимосвязи величин  $H_p$  после зубошлифования с их исходными значениями после ХТО (сталь 25ХГТ)

Были рассчитаны значения следующих показателей для зависимостей (1) и (2): остаточная сумма квадратов  $S$ , критерий Фишера  $F$  адекватности модели, средняя относительная ошибка  $\epsilon_{ср.}$  уравнения связи, критерий Стьюдента для оценки достоверности значений коэффициентов  $b, c, d$  в уравнениях (1) и (2).

Если получали  $F < F_{табл.}$  (для рассматриваемых 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  $\eta_t$  и эмпирических  $\eta_e$  корреляционных отношений.

Существенность в различии между  $\eta_e$  и  $\eta_t$ , а также  $\eta_t$  и  $r_{xy}$  оценивали с помощью критерия Романовского. Наши расчеты показали несущественность в различии между указанными характеристиками для всех исследованных показателей и условий обработки, что является одним из доказательств линейного характера рассматриваемых зависимостей. Значимость величин  $r_{xy}$  проверялась с помощью  $t$  – критерия Стьюдента; 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  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  каждого показателя соответственно до и после зубошлифования. Нами установлено [3], что распределение исследованных показателей подчиняется нормальному закону. Поэтому, определив экспериментально значения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , можно принять предельное поле рассеяния рассмотренных параметров  $x$  и  $y$  как  $6\sigma_x$  и  $6\sigma_y$  при 0,27%-ном уровне значимости [3]. Для оценки возможной степени изменения каждого из рассмотренных параметров качества поверхности зубьев в процессе зубошлифования были рассчитаны коэффициенты уточнения:

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

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

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

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

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

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

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

Основные результаты выполненных исследований приведены в таблице.

Значения  $a$ ,  $b$ ,  $\epsilon_{cp}$  и  $F$  даны для зависимости между значениями различных показателей качества до и после зубошлифования, описываемых уравнением (1). Так как для зависимости вида (1) значения  $\epsilon_{cp} = 7,1 - 18,7$ , значения  $S$ ,  $F$ ,  $t$  находятся в допустимых пределах, то зависимость (1) является предпочтительней зависимости (2), требующей более трудоемких расчетов при ее установлении и использовании.

В зависимости (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.

Значения " $b$ " 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 количественного изменения параметра при данной операции позволяет дать значение " $V$ ".

Величины  $\eta_r$ ,  $\eta_s$  и  $r_{xy}$  прямо пропорциональны соответствующим значениям " $b$ " и обратно пропорциональны значениям " $V$ ". Это следует из формулы:

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

Поэтому наиболее тесная связь с исходными значениями наблюдается (см. таблицу 1) у показателей  $H_u$  и  $\sigma_2$ , абсолютные значения которых при зубошлифовании изменяются в наименьшей степени, а менее тесная взаимосвязь у показателей  $R_a$  и  $\sigma_1$ , 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 абсолютного значения того или иного показателя в процессе зубошлифования ( $V$ ), тем большая доля его дисперсии наследуется с предыдущей операции (ХТО) и наоборот. Эта информация позволяет наметить пути управления рассматриваемыми параметрами, достижимыми после данной операции.

Таблица 1 – Значения основных статистических характеристик исследованных параметров

Операции обработки предшествующая и рассматриваемая	Материал зубчатых колес	Основные статистические характеристики														А, % шлиф	В, % (ХТО)
		$\bar{x}$	$\bar{y}$	$S_x$	$S_y$	$\nu = \frac{\bar{x}}{\bar{y}}$	a	b	$\eta_s$	$\eta_T$	$r_{xy}$	$t_r$	$\epsilon_{cp}$	F			
ХТО – зубошлифованная																	
		25ХГТ	8250	7240	1375	1206	1,14	2538	H <sub>ц</sub> , МПа		0,65	9,5	7,1	0,82	58,0	42,0	
		20ХН3А	7700	7000	1283	1167	1,1	2150	0,57	0,68	0,66	0,65	11,2	8,9	0,85	51,0	49,0
									R <sub>a</sub> , мкм		0,8	9,7	11,3	0,8	87,5	12,5	
		25ХГТ	3,0	1,3	0,5	0,2	2,5	0,88	0,14	0,42	0,4	0,35	11,3	0,8	87,5	12,5	
		20ХН3А	1,35	0,8	0,22	0,13	1,68	0,48	0,24	0,49	0,42	0,4	11,5	12,5	0,75	82,0	18,0
									σ <sub>1</sub> , МПа		0,6	4,25	12,5	0,86	66,0	34,0	
		25ХГТ	-840	1300	-140	216,7	-0,65	552	-0,89	0,64	0,61	0,58	4,25	12,5	0,86	66,0	34,0
		20ХН3А	-940	1540	-156	257	-0,6	600	-0,98	0,66	0,63	0,6	4,6	11,6	0,77	64,0	36,0
									σ <sub>2</sub> , МПа		0,65	5,8	18,7	0,95	58,0	42,0	
		25ХГТ	560	750	93,3	125	0,75	263	0,87	0,65	0,68	0,65	5,8	18,7	0,95	58,0	42,0
		20ХН3А	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

## Выводы

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что при зубошлифовании происходит снижение микротвердости поверхности зубьев на 700–1000 МПа, уменьшение параметра шероховатости  $R_a$  с 3,0 до 0,8 мкм для обоих исследованных материалов.

Остаточные напряжения 1-го рода  $\sigma_1$  из сжимающих порядка 800–950 МПа переходят в разряд растягивающих в пределах 1300–1550 МПа, а напряжения 2-го рода  $\sigma_2$  увеличиваются в среднем в 1,3 раза. Такой характер изменения твердости и остаточных напряжений является неблагоприятным фактором с точки зрения надежности работы зубчатых колес.

Значения общей части дисперсии  $A$  (создаваемой при зубошлифовании) исследованных параметров для шестерен, изготовленных из стали 25ХГТ, несколько превышают эти значения для деталей из стали 20ХНЗА. Так величина  $A$  по параметру  $H_u$  для стали 25ХГТ больше по сравнению со сталью 20ХНЗА на 12%; по  $R_a$  – на 6,3%; по  $\sigma_1$  – на 3% и по  $\sigma_2$  – на 3,5%.

Полученные данные позволяют моделировать изменения качества поверхности зубьев шестерен при зубошлифовании двусторонним коническим кругом, дают объективные характеристики этой операции для различных обрабатываемых материалов и позволяют выполнять как прогнозирование возможностей процесса зубошлифования, так и оптимизацию требований к исходным значениям качества поверхности зубьев перед зубошлифованием.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Производство зубчатых колес./ Под ред. Б.А. Тайца. –М.: Машиностроение, 1990. –463 с. 2. Соломин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. –М.: Машиностроение, 1972. –215 с. 3. Кане М.М. Статистический анализ изменения параметров точности цилиндрических зубчатых колес при шевинговании. – М: Вестник машиностроения, №5, 1990. С. 24–27.

УДК 621.373.826

Кобяков О.С., Спиридонов Н.В., Кукин С.Ф., Бузун Е.Л.

### ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ФРИКЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ УЗЛОВ СЦЕПЛЕНИЯ ТРАКТОРА «БЕЛАРУС»

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*Минский тракторный завод (МТЗ)*

*В статье рассмотрены проблемы повышения износостойкости и ресурса узлов сцепления трактора «Беларус» с использованием разработанной технологии лазерной поверхностной закалки*

Многолетняя эксплуатация тракторов производства РУП «Минский тракторный завод» показала, что тракторная техника может эксплуатироваться в течение 25–30 лет с минимальными затратами на техническое обслуживание и ремонтные издержки. Средняя наработка на отказ по сравнению с тракторами Российского производства: ЛТЗ-155А, ЛТЗ-60АВ, К-700, К-70 и отечественных тракторов: МТЗ-80, МТЗ-82, МТЗ-1221, МТЗ-1522 почти в 2–2,5 раза превосходят Российские. Сравнительный анализ эффективности тракторов МТЗ-80 и МТЗ-82 с аналогичными тракторами фирмы «John Deere» (США) моделей 6200 и 6200 со всеми ведущими колёсами показали несравненное преимущество отечественной техники. По таким параметрам, как: безотказность, цена, стоимости одного мотто-часа, отечественная техника дешевле тракторов фирмы «John Deere» в 5 раз. Затраты на ремонтные работы тракторов производства США в 5,5 раз больше, чем тракторов «Беларус» [1].

Учитывая новизну конструкции механизмов узлов сцепления и жёсткие требования к прочностным, износостойким характеристикам, сохранению линейных размеров детали разработка технологии термоупрочнения с использованием современной лазерной техники является крайне актуальной проблемой.

Исследования процессов лазерного термоупрочнения осуществлялись с помощью лазерной установки непрерывного излучения «Комета-2» мощностью 1,5 кВт с длиной волны излучения 10,2 мкм.