

## АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН ПРИ ИХ ШЕВИНГОВАНИИ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

В связи с постоянным ростом требований к современным машинам (ресурсу, виброакустическим характеристикам и др.) увеличиваются требования к точности и качеству поверхности зубьев цилиндрических шестерен, используемых в этих машинах. При обеспечении 7 – 9 степеней точности шестерен по ГОСТ 1643 – 81, характерных для современных грузовых автомобилей и тракторов, отечественные предприятия используют в основном два варианта их обработки [1]. В первом варианте производят шевингование, химико-термическую обработку (ХТО) и отделку зубьев методом свободного обката (часто зубохонингованием). Во втором варианте операции шевингования и зубохонингования исключают. Отделку зубьев после ХТО выполняют зубошлифованием. При необходимости обеспечить 7 – 8 степени точности шестерен по ГОСТ 1643 – 81 приемлемы оба варианта, хотя первый значительно дешевле [1]. Помимо экономичности шевингование позволяет обеспечить высокое качество поверхности зубьев. Это подтверждается приведенными ниже результатами выполненного нами исследования изменения параметров качества поверхностей зубьев цилиндрических шестерен при их шевинговании.

Исследование было выполнено в производственных условиях Минского тракторного завода и Минского завода шестерен для цилиндрических шестерен  $m = 3,5 - 6,0$  мм,  $z = 23 - 41$ , материал колес – стали 40Х, 25ХГТ, 20ХНЗА. До и после шевингования на одних и тех же зубьях шестерен были выполнены измерения параметра шероховатости поверхности  $R_a$ , микротвердости  $H_{\mu}$ , остаточных напряжений I и II родов  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в поверхностях зубьев. Было изучено 6 партий колес, по 2 партии для каждого материала. Объем партии  $\approx 15 - 20$  шт.

Все измерения до и после шевингования выполнялись на одних и тех же шестернях и зубьях. Использовалось не менее 4-х зубьев на каждой шестерне, расположенных под углом  $90^\circ$ . После обработки (зубофрезерования червячной фрезой, а затем шевингования) вырезались сегменты зубьев, на которых производились все измерения.

Измерения микротвердости производились с помощью прибора ПМТ-3 с нагрузкой 1,0 Н в трех точках по длине зуба в зоне делительной окружности. Измерения параметра шероховатости  $R_a$  производились в 3-х зонах на высоте зуба: у вершины, в зоне делительной окружности и у впадины зуба. Результаты измерений также усреднялись. Измерения остаточных напряжений I-го и II-го родов в поверхности зубьев выполнялись рентгеновским методом с помощью установки ДРОН-3.

Для обработки результатов использовались методы корреляционно-регрессионного анализа. Степень тесноты взаимосвязи значений параметров качества поверхности зубьев после шевингования с их исходными значениями оценивались с помощью коэффициента парной корреляции  $r_{xy}$ , эмпирического  $\eta_s$  и теоретического  $\eta_t$  корреляционных отношений. Существенность в различии между  $\eta_s$  и  $\eta_t$ , а также между  $\eta_t$  и  $r_{xy}$  оценивалась с помощью критерия  $\xi$  Романовского [2]. Значимость  $r_{xy}$  проверялась с помощью  $t$  – критерия Стьюдента. Степень изменения каждого параметра качества при шевинговании оценивалась с помощью коэффициента уточнения:

$$V = \frac{\bar{x}}{\bar{y}} \quad (1)$$

Здесь  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  – средние арифметические значения данного параметра качества до и после данной операции.

В качестве моделей процесса изменения параметров качества поверхности зубьев при шевинговании рассматривались полиномы первой и второй степени

$$y = a + bx \quad (2)$$

$$y = c + dx + ex^2 \quad (3)$$

где  $x$ ,  $y$  – значения различных параметров качества зубчатых колес до и после шевингования;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  – постоянные коэффициенты.

Для выбора вида связи, в наилучшей степени описывающей исследуемые зависимости, наряду с расчетом коэффициентов уравнений (2) и (3) должен быть определен также ряд показателей, характеризующих адекватность каждой из рассматриваемых теоретических зависимостей эмпирическим. При этом

эти расчеты должны выполняться для каждого из рассматриваемых параметров качества, не менее чем для 2-х партий зубчатых колес. В качестве характеристик адекватности модели могут быть приняты:

1. Остаточная сумма квадратов  $\xi$ .
2. F – критерий Фишера адекватности модели.
3. Средняя относительная ошибка уравнения связи  $\epsilon_{cp}$ .
4. Критерии Стьюдента для оценки достоверности значений коэффициентов “b”, “d” и “e” в уравнениях (2) и (3).

С целью установления общих закономерностей образования погрешности исследованных параметров на рассматриваемой операции необходимо выполнить разложение общей дисперсии этих параметров после каждой из изученных операций на две части  $S_{yx}^2$  и  $\delta_{yx}^2$ , из которых вторая характеризует влияние исходных погрешностей  $x_i$ , а первая – влияние прочих факторов, действующих независимо от  $x_i$  и являющихся следствием погрешностей самого изучаемого процесса.

$$S_y^2 = S_{yx}^2 + \delta_{yx}^2 \quad (4)$$

$$S_{yx}^2 = S_y^2(1 - r_{xy}^2) \quad (5)$$

$$\delta_{yx}^2 = b^2 S_x^2 = \left( r_{xy} \frac{S_y}{S_x} \right) \cdot S_x^2 \quad (6)$$

Определив затем величины A и B

$$A = \frac{S_{yx}^2}{S_y^2} \cdot 100 \quad (7)$$

$$B = \frac{\delta_{yx}^2}{S_y^2} \cdot 100 \quad (8)$$

можно установить части дисперсии результирующей погрешности  $S_y^2$ , из которых одна возникает на выходе, т.е. в данном случае на самой рассматриваемой операции (A), а вторая унаследована от исходных погрешностей, перенесена с предыдущей операции (B).

В таблице 1 приведены усредненные результаты выполненных расчетов для исследованных зубчатых колес. В таблице 1 приведены усредненные результаты выполненных расчетов для исследованных зубчатых колес.

Таблица 1. Статистические характеристики процессов изменения параметра качества поверхностей зубьев при шевинговании цилиндрических зубчатых колес

Материал зубчатых колес	Основные статистические характеристики														
	$\bar{x}$ , мкм	$\bar{y}$ , мкм	$S_x$ , мкм	$S_y$ , мкм	V	a	b	$\eta_b$	$\eta_r$	$r_{xy}$	$t$	$\epsilon_{cp}$	F	A	B
$Ra_{ум} = f(Ra_{об})$															
40X	1,026	0,405	0,185	0,044	2,53	0,32	0,085	0,43	0,4	0,36	3,13	9,32	0,83	87,0	13,0
25ХГТ	5,489	2,762	1,28	0,825	1,99	0,993	0,33	0,55	0,53	0,51	3,54	10,14	0,75	73,53	26,47
20ХНЗА	2,214	1,221	0,535	0,12	1,81	0,568	0,295	0,47	0,45	0,42	3,15	8,68	0,58	82,0	18,0
$H_{ум} = f(H_{об})$															
40X	2541,1	2055,1	250,1	160,1	1,24	1141,0	0,36	0,62	0,59	0,56	3,06	9,02	0,998	69,3	30,7
25ХГТ	2108,5	1887,8	192,5	147,5	1,17	903,1	0,467	0,65	0,63	0,61	4,83	6,37	0,799	63,0	37,0
20ХНЗА	1892,3	1682,2	124,7	97,3	1,12	887,4	0,42	0,60	0,57	0,64	6,2	10,91	0,893	71,0	29,0
$\sigma_{1ум} = f(\sigma_{1об})$															
40X	+358,9	-435,8	60,54	50,32	-0,82	-637,0	0,55	0,72	0,7	0,67	6,08	13,65	0,815	55,0	45,0
25ХГТ	+598,2	-133,2	65,0	54,99	-4,49	-405,0	0,55	0,70	0,67	0,65	6,34	16,4	0,897	42,0	38,0
20ХНЗА	+437,8	-259,2	61,55	56,32	-1,62	-539,0	0,64	0,75	0,72	0,70	5,26	10,3	0,83	51,0	49,0
$\sigma_{2ум} = f(\sigma_{2об})$															
40X	-437,0	348,3	67,8	64,8	1,25	11,8	0,77	0,93	0,90	0,88	9,15	19,2	0,82	23,0	77,0
25ХГТ	220,0	125,0	40,2	28,4	1,74	2,0	0,56	0,85	0,83	0,80	8,2	17,6	0,73	36,0	64,0
20ХНЗА	273,4	162,0	72,8	51,6	1,69	-18,4	0,66	0,9	0,87	0,85	9,0	19,5	0,63	28,0	72,0

Примечания: 1. Значения всех приведенных статистических характеристик представляют собой среднее арифметическое значение соответствующих показателей, рассчитанных для каждой из исследованных партий зубчатых колес. 2. Исходные значения параметров качества поверхности зубьев на предшествующей операции обозначены x, значения этих показателей на выполняемой операции – y. 3. Значения a, b,  $\epsilon_{cp}$ , F даны для зависимости  $y = f(x)$  вида (2).

При выборе вида взаимосвязи (см. уравнения (2) и (3)) между рассмотренными характеристиками качества поверхности зубьев шестерен до и после шевингования принимались во внима-

ние незначимость различий между значениями  $\eta_s$  и  $\eta_T$ ,  $\eta_T$  и  $r_{xy}$ , которая оценивалась с помощью критерия  $\xi$  Романовского, низкий уровень  $\varepsilon_{cp}$  для зависимости (2) ( $\varepsilon_{cp} = 0,7 - 19,6\%$ ) и адекватность зависимости (2) экспериментальным данным, которая устанавливалась с помощью критерия Фишера (для всех рассмотренных показателей точности и процессов обработки  $F \leq F_{кр}$ ,  $F_{кр} = F_{1-\alpha, m_1, m_2}$  при  $\alpha = 0,05$ ,  $n = 50$ ,  $K = 1$ ,  $m_1 = 50$ ,  $m_2 = 48$ ,  $F_{0,95, 50, 48} = 1,61$ . Здесь  $n$  – объем партии деталей,  $K$  – число независимых переменных в уравнении регрессии,  $1-\alpha$  – вероятность оценки адекватности уравнения регрессии,  $m_1 = n$  и  $m_2 = n - K$  – числа степеней свободы). Таким образом установлено, что взаимосвязи рассмотренных характеристик качества поверхности зубьев цилиндрических шестерен после шевингования с их исходными значениями перед шевингованием с достаточной точностью могут быть описаны полиномом первой степени (2).

Укажем основные результаты выполненных нами исследований изменения характеристик качества поверхности зубьев цилиндрических шестерен при их шевинговании.

#### Параметр $R_a$ шероховатости боковых поверхностей зубьев

При шевинговании имеет место наследование значений  $R_a$  ( $r_{xy} = 0,36-0,51$ ).

Однако степень тесноты взаимосвязи значений  $R_a$  после шевингования с их исходными значениями несколько меньше, чем для других характеристик качества поверхности зубьев. Можно считать, что шевингование является в определенной степени «барьером» на пути пооперационного наследования (копирования) значений  $R_a$ . Одной из причин этого является то, что исходные значения  $R_a$  перед этой операцией соизмеримы со снимаемым припуском. Уменьшение дисперсии  $R_a$  после шевингования может быть достигнуто в основном за счет совершенствования самого процесса шевингования ( $A = 73,5 - 87\%$ ). Шевингование существенно уменьшает значения  $R_a$  ( $V = 1,8 - 2,5$ ).

#### Микротвердость $H_u$ боковых поверхностей зубьев

Значения  $H_u$  после шевингования несколько уменьшаются ( $V = 1,1 - 1,24$ ) и достаточно тесно взаимосвязаны со своими исходными значениями ( $r_{xy} = 0,56-0,64$ ). Регулирование значений  $H_u$  после шевингования может быть осуществлено в основном за счет самой операции шевингования ( $A = 63 - 71\%$ ). Хотя и выбор рациональных исходных значений  $H_u$  может уменьшить их разброс после шевингования ( $B = 29 - 37\%$ ). Нами было выполнено исследование микроструктуры зубьев цилиндрических шестерен после зубофрезерования и шевингования. Установлено, что при шевинговании происходит некоторое увеличение размера зерен (примерно на 15%) и уменьшение пористости.

Усилия резания при шевинговании значительно меньше, чем при зубофрезеровании. Это вызывает снижение наклепа поверхностного слоя. Этому способствует и удаление тонкого поверхностного слоя высокой твердости, возникшего в результате наклепа металла при зубофрезеровании. Таким образом снижение микротвердости металла при шевинговании объясняется уменьшением степени его наклепа и изменением микроструктуры.

#### Остаточные напряжения первого рода $\sigma_1$ в поверхностном слое зубьев цилиндрических шестерен

Как видно из таблицы 1 для всех рассмотренных материалов зубчатых колес при шевинговании характерна тесная взаимосвязь значений  $\sigma_1$  с их исходными значениями после зубофрезерования ( $r_{xy} = 0,65 - 0,70$ ), т.е. при шевинговании имеет место технологическое наследование исходных значений  $\sigma_1$ . Шевингование преобразует растягивающие напряжения, возникшие при зубофрезеровании, в сжимающие и, как правило, уменьшает их значения, если рассматривать их без учета знака [ $V = (-0,82) - (-4,5)$ ]. Это объясняется описанными выше особенностями процесса резания при шевинговании (постепенное снятие тонких, упрочненных при зубофрезеровании слоев металла), изменениями микроструктуры металла.

Шевингование отличается более высокой степенью пластической деформации тонких поверхностных слоев обрабатываемых зубьев. Хотя сила резания при шевинговании уменьшается в среднем в 1,6 раза, объем снимаемой стружки уменьшается в 5 – 6 тысяч раз, что приводит к значительному росту удельных сил резания. Как известно, увеличение степени пластической деформации малопластичных материалов, к которым относятся и исследованные материалы зубчатых колес, вызывает резкое увеличение остаточных напряжений сжатия и глубины их проникновения в металл. Это является, на наш взгляд, основной причиной превращения растягивающих напряжений в поверхностном слое зубьев после зубофрезерования в сжимающие после шевингования. Этому способствует также снижение температуры в зоне резания при шевинговании примерно в 3 раза (с  $320 - 350^\circ$  до  $120 - 140^\circ$ ) по сравнению с зубофрезерованием.

Управление остаточными напряжениями 1-го рода в поверхности зубьев при шевинговании может быть осуществлено примерно с одинаковой эффективностью как за счет изменения условий выполнения данной операции, так и за счет изменения условий выполнения предшествующей операции (зубофрезерования) ( $A = 42,0 - 55,0\%$ ,  $B = 45,0 - 58,0\%$ ).

#### Остаточные напряжения второго рода $\sigma_2$ в поверхностном слое зубьев цилиндрических шестерен

Установлено, что для всех рассмотренных материалов цилиндрических зубчатых колес при шевинговании существует тесная взаимосвязь значений  $\sigma_2$  с их исходными величинами ( $r_{xy} = 0,80 - 0,88$ ), т.е. имеет место явление технологической наследственности при формировании значений  $\sigma_2$  после шевингования. При этом происходит некоторое уменьшение исходных значений  $\sigma_2$  ( $V = 1,25 - 1,74$ ).

Управление значениями  $\sigma_2$  после шевингования может быть осуществлено в основном за счет оптимизации исходных значений  $\sigma_2$  ( $A = 23,0 - 36,0\%$ ,  $B = 64,0 - 77,0\%$ ).

#### **Выводы**

1. Установлено наличие технологического наследования значений параметров качества поверхности зубьев цилиндрических шестерен  $R_a$ ,  $H_v$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  при их шевинговании, которое может быть описано полиномом первой степени. Это открывает возможности оптимизации требований к исходным значениям указанных параметров и повышения надежности процесса шевингования с точки зрения обеспечения требуемого качества поверхности зубьев.

2. Процесс шевингования позволяет уменьшить исходные значения  $R_a$  в 1,7 – 2,5 раза,  $H_v$  – в 1,12 – 1,24 раза,  $\sigma_2$  – в 1,25 – 1,74 раза, преобразует растягивающие напряжения I –го рода в поверхности зубьев в сжимающие. Все это улучшает эксплуатационные свойства шестерен.

3. Регулирование значений  $R_a$  и  $H_v$  после шевингования наиболее эффективно производить за счет совершенствования самого процесса шевингования, значений  $\sigma_2$  – за счет оптимизации их исходных значений перед шевингованием, значений  $\sigma_1$  – как за счет процесса шевингования, так и за счет предшествующей операции. Для всех рассмотренных параметров качества поверхностей зубьев оптимизация требований к их исходным значениям позволяет существенно (на 13 – 77%) уменьшить их дисперсию после шевингования.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Кане М.М., Медведев А.И., Каганер А.А. Точность и стоимость цилиндрических зубчатых колес // Теория и практика машиностроения, №2. –Мн.: Технопринт, 2004.
2. Райбман Н.С. Корреляционные методы определения характеристик сложных взаимосвязанных комплексов. «Приборостроение и средства автоматики». Справочник, т.1. Под общ. ред. А.Н. Гаврилова. –М.: Машгиз, 1963.

УДК 621.923

*Кривко Г.П.*

### **ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ НА СТРУКТУРУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Материальные затраты на изготовление деталей машин составляют основную часть всех затрат на производство любой сборочной единицы. Оптимальный метод получения заготовки определяется на основании подробного анализа материала детали, ее назначения, серийности выпуска. Снижение металлоемкости заготовки и, соответственно, материальных затрат по всей цепочке технологических процессов механической обработки деталей является одной из важнейших задач для каждого машиностроительного предприятия Республики Беларусь.