

УДК 621.833

А. А. Силич, д.т.н., проф., ТюмГНГУ, г. Тюмень

E-mail: silich@tsogu.ru

Экспериментальные работы по оценке эффективности шевингования колес передач Новикова ДЛЗ

Представлены результаты проведения экспериментальных работ по определению рациональных режимов шевингования зубчатых колес передач Новикова с двумя линиями зацепления, исходя из максимально возможного их исправления после обработки. Получено линейное уравнение регрессии, связывающее режимы обработки с величиной исправления колес после шевингования.

Ключевые слова: шевер, шевингование, план эксперимента, исправляемость колес, точность обработки, шероховатость поверхности, линейная модель, адекватность модели, рациональные режимы обработки.

A. A. Seelich

Experimental Works on the Wheels Shaving Efficiency of Novikov's Transfers with Double Line Gearing

Results of carrying out of experimental works by definition of rational shaving modes of cogwheels of Novikov's transfers with two lines of gearing, proceeding from their greatest possible correction after processing are presented. The linear equation the regresses connecting modes of processing with size of correction of wheels after shaving is received.

Keywords: shaver, shaving, the experiment plan, wheels correction, accuracy of processing, a surface roughness, linear model, adequacy of model, rational modes of processing.

Постановка проблемы

Среди известных методов зубоотделки эвольвентных колес наиболее широкое применение в основных отраслях машиностроения нашли зубошлифование и зубошевингование [1].

Не ставя своей целью детальный сравнительный анализ достоинств и недостатков этих способов обработки отметим, что в массовом и крупносерийном производстве используется главным образом шевингование, т.к. оно имеет более высокую производительность. Кроме того, шевингование позволяет повысить качество поверхностей зубьев в тех случаях, когда шлифование вообще не может быть использовано, как, например, при изготовлении высокоскоростных и тяжело нагруженных передач судовых турбоагрегатов.

У быстроходных зубчатых передач эксплуатационные качества в значительной степени определяются вибрациями и шумом. Основной причиной возникновения вибраций и шума, как известно, являются динамические процессы в зацеплении, обусловленные неточностями изготовления и сборки, условиями пересопряжения зубьев и рядом других, менее значимых причин. Применительно к высокоскоростным и тяжело нагруженным передачам большее значение имеют неточности изготовления, поэтому в практике отечественного и зарубежного машиностроения для снижения этих неточностей используется операция шевингования колес.

Уменьшение высоты микронеровностей поверхностей зубьев колес после шевингования оказывает положительное влияние не только на контактную прочность и изгибную выносливость зубьев, но и на потери от трения в зубчатых передачах.

Из выполненного анализа технической литературы можно заключить, что исследование эффективности способа шевингования является сложной, комплексной задачей, решение которой в полном объеме само по себе может составить предмет самостоятельного исследования.

Цель статьи

Исходя из вышеизложенного, в данной статье представлены результаты проведения экспериментальных работ по определению рациональных режимов шевингования колес исходя из максимально возможной их исправляемости после обработки.

Подготовка и проведение эксперимента

В настоящее время наиболее широкое применение для обработки колес средних модулей находят дисковые цельные шеверы, на которые разработан ГОСТ 8570-80. Шеверы используются для шевингования колес с твердостью рабочих поверхностей до HRC 33. Для обработки колес передач Новикова ДЛЗ был спроектирован и изготовлен шевер со следующими геометрическими параметрами: $m_n=4\text{мм}$, $\beta_u=10^\circ$, $z_u=67$, $x_u=0$. Проектирование осуществлялось по методике, разработанной автором [2].

Изготовление шеверов осуществлялось на Свердловском инструментальном заводе (СИЗе) из стали Р6М5 по технологии, основы которой изложены в работе [3]. Для шлифования зубьев шеверов был использован станок фирмы Сайкс рис.1, на котором имелось правильное устройство для правки круга по копиру.

При контроле шеверов применялись контрольно-измерительные средства, используемые при контроле эвольвентных шеверов. На рис. 2 в качестве примера показан момент контроля шевера на испытательной машине модели PFSU-640 фирмы Клингельнберг, предназначенной для автоматического и полуавтоматического контроля эвольвентных зубчатых колес.

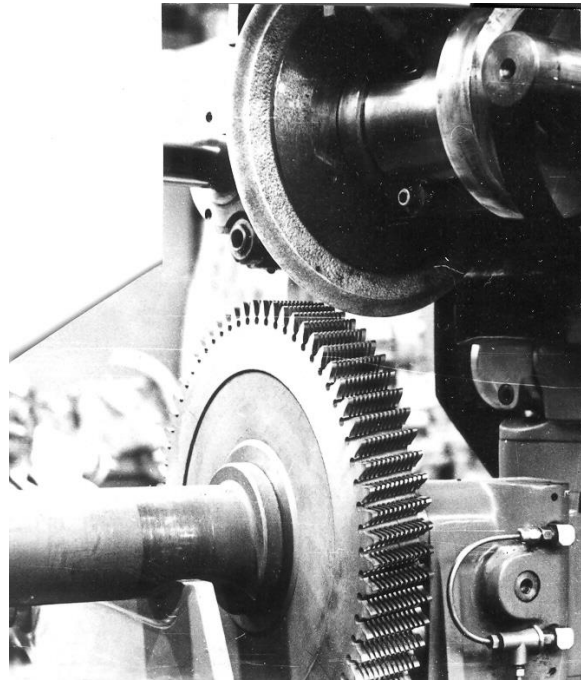


Рис. 1. Шлифование шевера на станке фирмы Сайкс

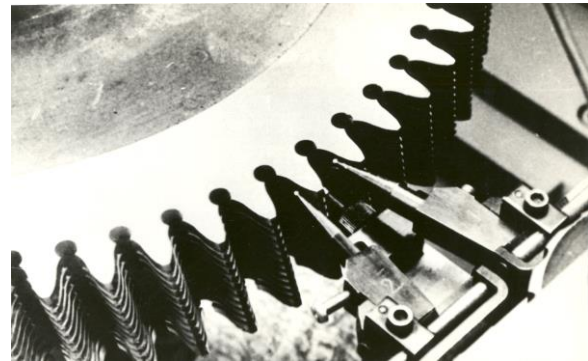


Рис. 2. Контроль шевера на испытательной машине модели PFSU-640 фирмы Клингельберг

Наибольшие трудности вызывает контроль профиля зуба шевера, т.к. отсутствуют специальные приборы для этой цели. На СИЗе контроль профиля зуба шевера осуществлялся на проекторе по торцу зуба. Окончательный контроль профиля зуба шевера с исходным контуром ЮТЗ-65 осуществлялся по методу, описанному в работе [4], на универсальном эвольвентомере типа КЭУ.

Предельные отклонения контролируемых параметров шеверов с исходным контуром ЮТЗ-65 соответствовали классу точности А по ГОСТ 8570-80, кроме тех, которые указаны в табл.1.

Для проведения опытов по определению рациональных режимов обработки была изготовлена партия зубчатых колес из сталей 38ХНЗМА и 40Х по ГОСТ 4543-71, с $HB < 350$, $z_k = 31$, правым углом наклона линии зубьев $\beta_k = 25^\circ 58' 33''$, шириной зубчатого венца $b_k = 50$ мм с исходным контуром ЮТЗ-65.

Нарезание колес осуществлялось на зубофрезерном станке модели 5К310 червячными фрезами Свердловского инструментального завода. Имеющиеся контрольно-измерительные средства позволяли контролировать следующий комплекс показателей точности зубчатых колес: радиальное биение зубчатого венца F_{rr} ; накопленную погрешность k шагов F_{pkr} ; накопленную погрешность шага по зубчатому колесу F_{pr} ; отклонение шага f_{ptr} и погрешность профиля зуба f_{fr} .

Контролируемые параметры шевера с исходным контуром ЮТЗ-65

Наименование и обозначение контролируемого параметра	Допускаемое отклонение в мкм для шевера класса точности А	Фактическое отклонение в мкм
1. Радиальное биение зубчатого венца F_{ro}	10	28
2. Накопленная погрешность окружного шага $F_{pго}$	12	14
3. Разность окружных шагов $f_{vptо}$	3	5
4. Погрешность профиля зуба f_{fo}	6	70
5. Шероховатость боковых поверхностей зубьев	R_z16	$R_a0,2$

Измерение погрешности профиля зуба колеса передачи Новикова осуществлялось на универсальном эвольвентомере КЭУ по методу, аналогичному методу контроля погрешности профиля зуба шевера.

Параметры шероховатости рабочих поверхностей зубьев колес определялись по профилограммам, снятым со слепков, на профилографе-профилометре модели 201.

Отклонения показателей точности фрезерованных и затем шевингованных зубчатых колес в ходе эксперимента представлены в таблице 2.

Для осуществления одностороннего шевингования на станке модели 5702 он был дооснащен тормозным устройством, обеспечивающим на колесе момент торможения не менее 100...120 Н·м. Модернизация станка заключалась в оснащении его двумя порошковыми тормозами типа ПТ-6М, обеспечивающими максимальную суммарную величину тормозного момента 120 Н·м, изготовлении новой бабки станка, шпиндель которой был соединен с валом тормоза.

В таблице 3 указаны точностные характеристики зубошевинговального станка модели 5702, замеренные непосредственно перед началом эксперимента.

Экспериментальные работы по выбору рациональных режимов шевингования колес.

Для поиска рациональных режимов шевингования и сокращения числа опытов была использована методика рационального планирования эксперимента [5].

Таблица 2

**Показатели точности фрезерованных и шевингованных колес передач Новикова
с исходным контуром ЮТЗ-65**

№ коле са	Шероховатость и показатели точности в мкм									
	R _{max}		F _{гр}		f _{пр}		F _{пр}		F _{пкр}	
	Фрезе рован	Шевинг ован	Фрезе рован	Шеви нгован	Фрезерован н	Шевингова н	Фрезер ован	Шевинг ован	Фрезер ован	Шевинг ован
31	35	2,2	37,5	46,0	+10,5;-10,0	+ 8,0;- 6,0	29,5	33,5	26,0	24,5
32	35	1,5	48,0	60,0	+11,0;-12,0	+15,0;-11,5	56,0	76,5	42,5	52,5
33	35	3,4	43,5	48,0	+11,0; -8,0	+15,0;-11,0	44,5	52,5	37,5	44,0
34	35	3,0	53,5	57,5	+26,0;-21,0	+10,0;-11,0	49,5	39,0	39,0	33,5
35	35	1,4	60,0	67,0	+23,0;-29,0	+14,0;-19,0	62,5	59,0	55,5	46,0
36	35	2,2	74,0	75,0	+23,0;-24,0	+ 9,0;-13,5	72,0	63,5	52,5	47,5
37	35	1,5	45,0	68,0	+17,5;-12,0	+ 9,5;-11,0	47,0	51,0	33,5	39,0
38	35	2,6	43,0	43,5	+11,0;-10,0	+ 9,5;-11,5	51,5	74,0	39,5	45,5
39	35	2,0	51,0	37,0	+11,0;-13,0	+11,0;- 9,5	55,0	54,5	40,5	40,0
40	35	2,9	35,5	43,0	+11,5;-14,5	+ 8,5;-12,0	53,0	53,0	41,5	39,0
41	35	2,0	64,0	60,5	+11,0;-12,0	+ 9,0;-10,0	58,5	60,0	35,5	40,0
42	35	3,0	40,5	42,0	+10,0; -8,0	+ 8,0; -7,5	24,0	31,0	24,0	24,5
43	35	3,6	38,0	41,5	+9,5;-12,0	+9,5;-11,5	42,0	44,5	27,0	30,5
44	35	1,7	53,0	33,0	+9,0; -8,0	+9,5; -6,5	35,0	40,0	18,5	20,5
45	35	3,0	35,0	44,0	+19,0;-16,0	+10,0;- 7,0	63,0	28,0	40,0	19,0
46	35	2,8	53,0	55,5	+18,0;-17,5	+10,5;-10,5	51,5	46,0	21,5	24,0

Таблица 3

Точностные характеристики станка модели 5702

Наименование характеристики	Отклонение
1. Радиальное биение посадочного места под шевер	0,006 мм
2. Торцовое биение опорного буртика под шевер	0,004 мм
3. Радиальное биение оправки под шевингуемое колесо в центрах бабок станка	0,010 мм
4. Торцовое биение оправки под шевингуемое колесо в центрах бабок станка	0,010 мм
5. Непараллельность перемещения стола оси шевера	0,004 мм на 100мм длины

По опыту шевингования эвольвентных колес известно, что оно значительно уменьшает шероховатость рабочих поверхностей зубьев и улучшает показатели плавности работы: погрешность профиля зуба $f_{гр}$, отклонение шага $f_{пр}$, отклонение шага зацепления $f_{пкр}$ и циклическую погрешность зубчатого колеса $f_{зкр}$.

В качестве параметра оптимизации при планировании эксперимента принималась величина y_1 , равная отношению $R_{\max\phi}/R_{\max\psi}$ параметров шероховатости поверхностей зубьев фрезерованного и шевингованного колес.

Выходные точностные параметры процесса шевингования колес зацепления Новикова, к которым относятся:

$$y_2 = F_{гр\phi} / F_{гр\psi}; \quad y_3 = F_{ркт\phi} / F_{ркт\psi}; \quad y_4 = F_{рр\phi} / F_{рр\psi}; \quad y_5 = f_{ртр\phi} / f_{ртр\psi}; \quad (1)$$

были взяты в качестве ограничений процесса. При $y_i > 1$ ($j = 1, 2, 3, 4, 5$) происходит улучшение показателей точности и параметров шероховатости поверхности зубьев.

Для получения более полной информации о процессе необходимо включать в рассмотрение все факторы, влияющие на него. Среди множества факторов, исходя из поставленной задачи и условий проведения эксперимента, были выделены существенные, которыми можно управлять в процессе эксперимента. Такими факторами оказались:

- \dot{x}_1 - момент торможения;
- \dot{x}_2 - число оборотов шевера в минуту;
- \dot{x}_3 - продольная подача;
- \dot{x}_4 - число рабочих ходов;
- \dot{x}_5 - число калибрующих ходов.

Такое выделение не противоречит существующим представлениям о роли различных факторов в процессе шевингования и методике планирования эксперимента [5].

Принимая во внимание возможности станка и рекомендации по режимам обработки эвольвентных зубчатых колес, были выбраны области варьирования (табл.4) и интервалы варьирования (табл. 5) факторов. Заметим только, что калибрующие ходы осуществлялись при моменте торможения 30 Н·м.

Таблица 4

Области варьирования факторов

Фактор	Обозначение фактора	Области варьирования
Момент торможения, Н·м	\dot{x}_1	80...120
Число оборотов шевера в мин	\dot{x}_2	50...125
Продольная подача стола в мм/об. колеса	\dot{x}_3	0,164...0,536
Число рабочих ходов	\dot{x}_4	12...20
Число калибрующих ходов	\dot{x}_5	2...6

При выборе плана постановки эксперимента прежде всего приходится учитывать критерии оптимальности и число опытов. Предполагается, что модель будет линейной, поэтому искомый план должен быть двухуровневым, ортогональным и ротатабельным.

Для сокращения числа опытов выбираем 1/4 реплики 2^{5-2} с определяющими контрастами:

$$1=X_1X_2X_3X_4, \quad 1=X_2X_3X_5.$$

Таблица 5

Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровни	Факторы				
	\dot{x}_1	\dot{x}_2	\dot{x}_3	\dot{x}_4	\dot{x}_5
Основной	100	87,5	0,35	16	4
Интервал варьирования	20	37,5	0,186	4	2
Верхний	120	125	0,536	20	6
Нижний	80	50	0,164	12	2

При выборе типа планирования получаем следующую систему смешивания оценок:

$$b_0 \rightarrow \beta_0; \quad b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{45} + \beta_{234} + \beta_{1235}; \quad b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{35} + \beta_{134} + \beta_{1245};$$

$$b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{25} + \beta_{124} + \beta_{1345}; \quad b_4 \rightarrow \beta_4 + \beta_{15} + \beta_{123} + \beta_{2345};$$

$$b_5 \rightarrow \beta_5 + \beta_{14} + \beta_{23} + \beta_{12345}; \quad b_{12} \rightarrow \beta_{12} + \beta_{34} + \beta_{135} + \beta_{245};$$

$$b_{13} \rightarrow \beta_{13} + \beta_{24} + \beta_{125} + \beta_{345}.$$

Условия проведения первой серии опытов в натуральных переменных представлены в табл. 6.

Переход от натуральных значений факторов к кодированным значениям задается формулами:

$$X_1 = (\dot{x}_1 - 100)/2; \quad X_2 = (\dot{x}_2 - 87,5)/37,5; \quad X_3 = (\dot{x}_3 - 0,35)/0,186;$$

$$X_4 = (\dot{x}_4 - 16)/4; \quad X_5 = (\dot{x}_5 - 4)/2. \quad (2)$$

Как известно, параллельные опыты нужны для исключения грубых наблюдений и оценки дисперсии воспроизводимости. Так как предварительно найденная дисперсия воспроизводимости по серии опытов в центре плана $S^2_{y1} = 0,063$, было выбрано минимальное число параллельных опытов - два.

Результаты контроля шевингованных колес приведены в таблице 2. Обработка результатов была проведена по схеме с равномерным дублированием опытов. Проверка однородности дисперсии производилась с помощью критерия Кохрена:

$$G = S^2_{1\max} / \sum_{i=1}^n S^2_{1i} = 3,7648/9,1685 = 0,411. \quad (3)$$

Таблица 6

Уровни проведения опытов

№ опыта	№ параллельного опыта	Факторы				
		\dot{x}_1	\dot{x}_2	\dot{x}_3	\dot{x}_4	\dot{x}_5
1	9	120	125	0,536	20	6
2	10	80	125	0,536	12	6
3	11	120	50	0,536	12	2
4	12	80	50	0,536	20	2
5	13	120	125	0,164	12	2
6	14	80	125	0,164	20	2
7	15	120	50	0,164	20	6
8	16	80	50	0,164	12	6

Результаты контроля шевингованных колес приведены в таблице 2. Обработка результатов была проведена по схеме с равномерным дублированием опытов. Проверка однородности дисперсии производилась с помощью критерия Кохрена:

$$G = S^2_{1\max} / \sum_{i=1}^n S^2_{1i} = 3,7648 / 9,1685 = 0,411. \quad (3)$$

Табличное значение критерия для восьми разных опытов и числа степеней свободы $f = n - 1 = 1$ равно 0,68 (уровень значимости 0,05).

Экспериментальная величина G-критерия не превышает табличного значения, следовательно, гипотеза об однородности дисперсии принимается. Дисперсия воспроизводимости равна:

$$S^2_{y1} = \sum_{i=1}^n S^2_{1i} / 8 = 9,1685 / 8 = 1,146. \quad (4)$$

Число степеней свободы этой дисперсии $N(n-1) = 8$.

Расчет коэффициентов регрессии производим по формулам [5]:

$$b_j = \sum_{i=1}^n y_{1i} X_{ji} / N; \quad b_{uj} = \sum_{i=1}^n y_{1i} X_{ui} X_{ji} / N. \quad (5)$$

В результате расчетов получим:

$$\begin{aligned} b_0 &= 15,75; & b_4 &= 0,009; & b_1 &= -0,161; & b_5 &= 1,186; \\ b_2 &= -1,979; & b_{12} &= 0,576; & b_3 &= -4,114; & b_{13} &= 0,406. \end{aligned}$$

Дисперсия коэффициентов регрессии:

$$\bar{S}^2_{bi} = S^2_{y1} / N = 1,146 / 8 = 0,143. \quad (6)$$

Оценка адекватности линейной модели:

$$y_1 = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_5 X_5 \quad (7)$$

производилась по критерию Фишера.

Дисперсия адекватности

$$S^2_{ад} = \sum_{i=1}^n (d y_i) / f = 3,9659 / 2 = 1,983. \quad (8)$$

Число степеней свободы дисперсии адекватности $f = 8 - (5 + 1) = 2$.

Экспериментальное значение критерия Фишера F равно:

$$F_{эксп} = S^2_{ад} / S^2_{y1} = 1,983 / 1,146 = 1,73. \quad (9)$$

Табличное значение критерия Фишера [5] для числа степеней свободы числителя 3 и знаменателя 8 равно: $F_T = 4,5$. Экспериментальная величина F -критерия не превышает табличного значения, гипотеза об адекватности модели не отвергается.

Оценим значимость коэффициентов регрессии. Величина t -критерия для уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы, с которыми определялась величина S^2_{y1} , равна 2,306 /5/. Доверительный интервал

$$\delta b_j = \pm t S^2_{bj} = +2,306 \times 0,378 = +0,873. \quad (10)$$

Абсолютные величины коэффициентов b_2 , b_3 и b_5 регрессии больше доверительного интервала, следовательно, гипотеза о не значимости этих коэффициентов отвергается.

Линейная модель зависимости параметра оптимизации от рассматриваемых параметров принимает следующий вид:

$$y_1 = 15,75 - 1,975X_2 - 4,114X_3 + 1,186X_5. \quad (11)$$

Характер влияния линейных коэффициентов уравнения регрессии (11) таков: с увеличением числа оборотов шевера (скорости резания) и подачи величина шероховатости увеличивается; с увеличением числа калибрующих проходов - уменьшается.

Опираясь на полученную линейную модель параметра оптимизации (11) и ограничения (1), были выбраны рациональные режимы шевингования:

$$\dot{x}_1 = 100 \text{ Нм}; \quad \dot{x}_2 = 125 \text{ об/мин}; \quad \dot{x}_3 = 56 \text{ мм/мин}; \quad \dot{x}_4 = 20; \quad \dot{x}_5 = 6,$$

которые были использованы в дальнейших экспериментальных работах по оценке эффективности процесса шевингования колес передач Новикова.

Выводы

1. Экспериментально подтверждена возможность шевингования колес передач Новикова ДЛЗ на существующем технологическом оборудовании односторонним методом обработки колес.
2. Экспериментально определены рациональные режимы шевингования колес передач Новикова с исходным контуром ЮТЗ-65 при одностороннем методе обработки.

3. Разработанный метод шевингования является эффективным методом повышения качества зубчатых колес цилиндрических передач Новикова, т.к. значительно улучшает показатели точности $f_{рт}$ и $f_{г}$ характеризующие плавность работы и незначительно улучшает или оставляет без изменения показатели кинематической точности $F_{рт}$, $F_{ркг}$ и $F_{г}$ зубчатых колес передач Новикова.
4. Шевингование значительно уменьшает шероховатость рабочих поверхностей зубьев колес с R_z10-30 у фрезерованных до $R_a1,25-0,36$ у шевингованных.

Список литературы

1. **Производство** зубчатых колес: Справочник / С.Н. Калашников, А.С. Калашников и др.; Под ред. Б.А. Тайца. - 3-е изд. перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1990. - 464 с.
2. **Силич А.А.** Методика проектирования инструментов для обработки колес цилиндрических передач Новикова // Проблемы развития ТЭК Западной Сибири на современном этапе: Труды Международной научно-технической конференции. – Тюмень, ТюмГНГУ, 2003. – Т.2. - С.109-113.
3. **Силич А.А.** Разработка геометрической теории проектирования передач Новикова и процесса формообразования зубьев колес: Дисс.... докт. техн. наук. - Курган, 1999. – 534с.
4. **Мухин А.Ф., Филиппович С.М.** Об одном из способов контроля профиля зуба колеса зацепления Новикова /Курган. машиностроительный ин-т.-Курган,1987.-17с.-Деп. в ВНИИТЭМР 10.06.87, N 273, мш - 87 Деп.
5. **Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.:Наука,1976. - 279с.