

Э.Н. ГУЛИДА, д.т.н., проф., А.М. ЖАРОВСКИЙ, инженер, Львов,
Украинская Академия печати

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ЗУБОНАРЕЗАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЁС ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ

Influencing of technological and structural factors on exactness of toothing operations cylinder gear-wheels is considered helical milling cutters. A mathematical model is developed and its adequacy is tested. As a result of researches the technological are definite and structural factors which most affect eventual exactness of gear-wheels.

Современное состояние проблемы. В соответствии с данными литературы после операции зубофрезерования червячными фрезами можно получить зубчатые колёса 8-9 степени точности согласно ГОСТ 1643-81 [1]. Однако отсутствуют результаты экспериментальных исследований по обеспечению кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев в передаче после зубофрезерной операции, в процессе выполнения которой на точность обработки влияют технологические и конструктивные факторы.

Цель работы. Исследовать процесс зубонарезания цилиндрических зубчатых колёс червячными фрезами с целью установления влияния технологических и конструктивных факторов на точность зубчатого колеса.

Методика проведения экспериментальных исследований процесса зубофрезерования и математическая обработка результатов. Из предложенных ГОСТ 1643-81 комплексов контроля зубчатых колес при проведении экспериментальных исследований были приняты следующие показатели для:

- кинематической точности - F_{rr} (радиальное биение зубчатого венца) и F_{vWR} (колебание длины общей нормали);
- плавности работы - ffr (погрешность профиля);

определения контакта зубьев в передаче - $F\beta$ (погрешность направления зубца) для зубчатых колес с шириной зубчатого венца меньше

$\frac{4}{\sin \beta} m$ (см. ГОСТ 1643-81), и суммарное пятно контакта по высоте зуба (

$H = \frac{h_m}{h_p} \cdot 100\%$, где h_m - высота следов прилегания; h_p - высота

соответствующей активной поверхности) и по длине зуба ($B = \frac{a-c}{b} \cdot 100\%$,

где a - расстояние между крайними точками следов прилегания; c - длина разрывов следов прилегания; b - длина зуба).

Для проведения опытов использовались зубофрезерные станки модели 5В312, на которых выполнялись основные опыты на Львовском заводе гидромеханических передач. Кроме того, дополнительно выполнялись контрольные опыты на зубофрезерном станке Volman F.O.6, на котором обрабатывались зубчатые колёса модулей $m=3$ мм и $m=6$ мм с соответствующим количеством зубьев, необходимым при каждом исследовании. Для контрольных исследований использовались зубчатые колёса из стали 40Х ГОСТ 1050-74 после термической обработки (улучшение до твердости НВ 170...240).

Зубчатые колёса нарезались червячными фрезами класса точности А, которые изготавливались из стали Р6Г5К5МП и которые использовались на Львовском заводе гидромеханических передач при зубофрезеровании серийных зубчатых колес.

Для контрольных экспериментальных исследований использовали зубчатые колеса:

- шестерня ведомая вторичного вала гидромеханической коробки передач (№ 22.1701107): количество зубьев $z=37$; модуль $m=4,5$ мм; угол наклона зубьев $\beta=26^\circ 10' 37''$; материал зубчатого колеса сталь 12ХНЗА ГОСТ 4543-71;

- шестерня ведомая вторичного вала гидромеханической коробки передач (№ 695В-1506486-В): $z=19$; $t_p=4,5$ мм; $\beta=17^\circ30'00''$; материал зубчатого колеса сталь 12ХНЗА ГОСТ 4543-71;

- зубчатые колеса (специально изготовленные для проведения полнофакторного эксперимента): $z=19$, $t_p=6$ мм; $\beta=0^\circ$; материал зубчатого колеса сталь 40Х ГОСТ 1050-74, улучшенная до твердости НВ 170.. 240;

- зубчатые колеса (специально изготовленные для проведения полнофакторного эксперимента): $z=37$, $t_p=6$ мм; $\beta=0^\circ$; материал зубчатого колеса сталь 40Х ГОСТ 1050-74, улучшенная до твердости НВ 170.. 240.

При зубообработке всех зубчатых колес использовалась смазывающе-охлаждающая жидкость сульфозрезол (ГОСТ 122-84).

Контроль радиального биения F_{ir} зубчатого венца и погрешность направления зубца $F_{\beta r}$ производился на универсальном зубоизмерительном приборе МИЗ. Для определения колебания длины общей нормали F_{vWt} использовался микрометрический нормалемер типа МЗ, ГОСТ 6507-60. Погрешность профиля зуба зубчатого колеса измерялась с помощью универсального эвольвентомера типа КЕУ-М, а пятно контакта обработанных зубчатых колес контролировалось с помощью контрольно-обкатного станка модели 5А725.

Значение граничных технологических и конструктивных факторов и их кодирование для проведения полнофакторного эксперимента приведено в табл. 1.

Таблица 1

Граничные значения технологических и конструктивных факторов и их кодирование

Рівні значень	Технологические факторы			Конструктивные факторы	
	Подача s , мм/об, x_1	Скорость резания v , м/хв, x_2	Глубина резания t , мм, x_3	Модуль m , мм, x_4	Число зубьев z , x_5
Верхний уровень (+)	3,0	50	13,4	6	37
Средний уровень (0)	2,0	35	11,7	5,25	28
Нижний уровень (-)	1,0	20	10,0	4,5	19
Интервал δ_i ,	1,0	15	1,7	0,75	9

Результаты экспериментальных исследований дали возможность сделать их математическую обработку для полнофакторного регрессионного анализа статистических данных [2]. В результате математической обработки были получены полиномы первой степени.

Адекватность математической модели была проверена по критерию адекватности Фишера, который для данных условий при 5%-ом степени значимости равен $F_{(0,05;f1;f2)}=1,8874$ [2].

Результаты проверки свидетельствуют о том, что линейная модель адекватна экспериментальным данным, и что ее можно использовать для прогнозирования значения отклика при любых значениях факторов которые находятся между верхним и нижним уровнями [2,4].

После приведения к натуральным переменным, уравнения принимают такой вид:

$$F_{rr} = -21,02 + 7,56s + 0,202v + 1,047t + 2,37m + 0,69z; \quad (7)$$

$$F_{vWr} = -22,55 + 3,47s + 0,089v + 0,97t + 2,21m + 0,7z; \quad (8)$$

$$f_{fr} = 5,14 + 2,09s + 0,073v + 0,16t + 0,37m - 0,003z; \quad (9)$$

$$F_{\beta r} = -8,89 + 3,78s + 0,08v + 0,83t + 1,88m + 0,017z; \quad (10)$$

$$H = 64,21 - 3s - 0,079v - 0,37t - 0,84m - 0,055z; \quad (11)$$

$$B = 91,94 - 4,78 - 0,152v - 0,68t - 1,55m - 0,073z. \quad (12)$$

Рассмотрим влияние каждого фактора на показатели точности зубчатых колёс с использованием полученной математической модели и результатов контрольных экспериментальных исследований.

Влияние подачи. Исследование влияния величины подачи на точность зубьев зубчатых колёс было выполнено на зубчатых колёсах с модулями $m_n=3$ и 6 мм с числом зубьев $z=30$ для $m_n=3$ мм, и $z=37$, для $m_n=6$ мм на зуборезном станке Volman F.O.6. Затупление зубьев фрезы по задним и боковым граням $h_{з.б.}$ не превышало 0,1 мм. Значение скорости резания принималось равным $v=35$ м/мин. Исследования выполнялись при значениях подач: $s=1,0, 1,5, 2, 2,5, 3$ мм/об.

Как видно из результатов исследований (рис. 1), наибольшее влияние подача оказывает на погрешность профиля зубьев ffr .

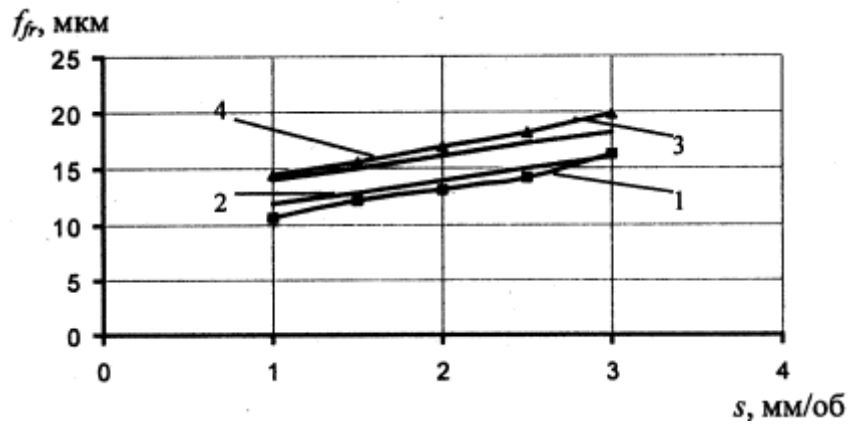


Рис 1. Зависимость погрешности профиля зуба f_{fr} от подачи s . 1,3 - результаты экспериментальных исследований для зубчатых колёс $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно; 2, 4 - кривые построение в соответствии с зависимостью (9) для зубчатых колёс $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно.

Это можно объяснить тем, что увеличение подачи приводит к увеличению площади поперечного среза и увеличению объема деформации в зоне резания, то есть к увеличению составляющих силы резания и, соответственно, к увеличению упругих деформаций технологической системы, что также приводит к уменьшению пятна контакта по длине зуба B , и по высоте зуба H (рис. 2).

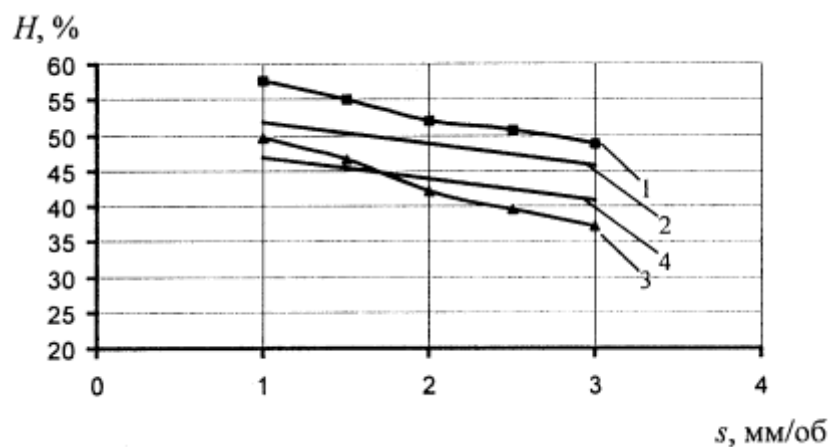


Рис 2. Зависимость размера пятна контакта по высоте зубца H от подачи s . 1,3 - результаты экспериментальных исследований для зубчатых колёс $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно; 2, 4 - кривые построенные в соответствии с зависимостью (11) для зубчатых колёс $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно.

На рис. 3 представлено графические зависимости возрастания радиального биения зубчатого венца F_{rr} при увеличении подачи s . Кроме того, из-за неравномерности работы червячной фрезы и возрастания силы резания, увеличивается также амплитуда колебания детали и приспособления в радиальном и тангенциальном направлениях за время поворота фрезы на

зуб (гребенку). Меньшее влияние оказывает подача s на погрешность направления зубьев $F_{\beta r}$ и колебание длины общей нормали F_{vWr} .

Анализ полученных данных (табл. 2) показывает, что максимальная относительная ошибка расчётных значений радиального биения зубчатого венца F_{rr} по зависимости (7) и действительных значений полученных после экспериментальных исследований составляет 17,2% для зубчатых колёс $m_n=3$ мм, и 17,6% для $m_n=6$ мм. Такую погрешность для проведенных исследований можно считать допустимой [3, 4].

Таблица 2

Сравнительные значения радиального биения зубчатого венца F_{rr}

Значения подачи s , мм/об	Расчетное значение, мкм		Действительное значение, мкм		Относительная ошибка, %	
	$m_n=3$	$m_n=6$	$m_n=3$	$m_n=6$	$m_n=3$	$m_n=6$
1,0	28,383	41,18	24,2	35	17,28	17,65
1,5	32,163	44,96	29,3	40	9,77	12,4
2,0	35,943	48,74	34,6	45,1	3,88	8,07
2,5	39,723	52,52	40,4	51,1	1,67	2,77
3,0	43,503	56,3	47,4	59,4	8,22	5,21

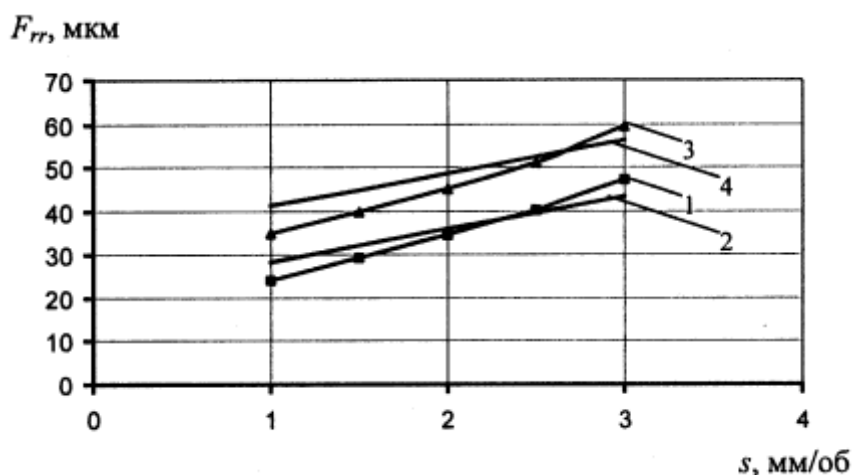


Рис 3. Зависимость радиального биения зубчатого венца F_{rr} от подачи s . 1,3- результаты экспериментальных исследований для зубчатых колёс $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно; 2, 4 - кривые построенные в соответствии с зависимостью (7) для зубчатых колёс $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно.

Аналогичные сравнения экспериментальных данных и расчетных, показало, что относительная погрешность между ними составляет:

- для погрешности профиля f_{fr} 11,9% и 8,0%, для зубчатых колёс $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно;

- для колебания длины общей нормали F_{vWr} 13,2% при $m_n=3$ мм, и 10,7% при $m_n=6$ мм;

- для погрешности направления зуба $F_{\beta r}$ 14,1% для зубчатых колёс $m_n=3$ мм, 8,2% для $m_n=6$ мм;

- для величины пятна контакта по высоте зуба H - 10,0% и 10,3%, для $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно;

- для величины пятна контакта по ширине зуба B - 8,4% и 10,2%, для $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно.

Влияние скорости резания. Исследование влияния скорости резания на точность обработки изучалось на партии зубчатых колёс с модулями $m_n=3$ и 6 мм. Скорость резания изменялась ступенчато в пределах: $v=20, 27, 35, 42$ и 50 м/мин. Глубина резания сохранялась постоянной. Нарезание зубьев производилось при подаче $s=2$ мм/об, которая была одинаковой для всей серии опытов. Значения остальных технологических факторов оставались теми же, что и при исследовании влияния подачи.

Анализ экспериментальных данных показал, что скорость резания оказывает влияние на точность зубофрезерования, что особенно заметно на погрешности профиля f_{fr} , на размере пятна контакта по высоте зуба H (рис. 4) и на радиальное биение зубчатого венца F_{rr} .

Это можно объяснить тем, что с увеличением скорости резания повышается скорость изменения деформации технологической системы от минимальных значений до максимальных за поворот фрезы на один зуб, что приводит к увеличению амплитуды и частоты колебаний.

Влияние скорости резания v на колебание длины общей нормали F_{vWr} , погрешность угла наклона зубьев $F_{\beta r}$ и размер пятна контакта по длине B сравнительно невелико.

Результаты контрольных экспериментальных исследований сравнивались с данными, которые были получены для тех же условий с помощью зависимостей (7-12), что дало возможность также установить относительную погрешность между экспериментальными данными и результатами математической модели:

- для значений радиального биения зубчатого венца F_{rr} - 12,3% и 12,0%, для зубчатых колёс $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно;

- для погрешности профиля f_{fr} разница составила 17,4% и 9,2%, для зубчатых колёс $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно;

- для колебания длины общей нормали F_{vWr} 15,7% при $m_n=3$ мм, и 12,4% при $m_n=6$ мм;

- для погрешности направления зуба $F_{\beta r}$ 11,4% для зубчатых колёс $m_n=3$ мм, 8,7% для $m_n=6$ мм;

- для величины пятна контакта по высоте зуба H - 9,5% и 8,9%, для $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно;

- для величины пятна контакта по ширине зуба B - 11% и 12%, для $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно.

На рис. 4 представлено зависимость пятна контакта по высоте зуба H , колеса от скорости резания v

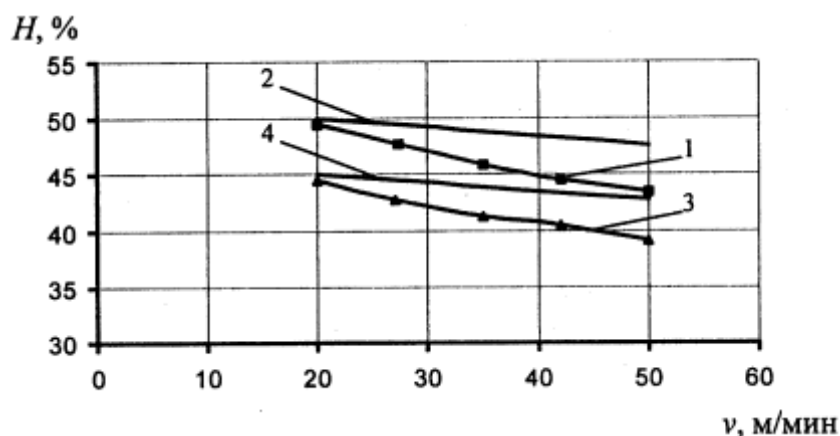


Рис 4. Зависимость размера пятна контакта по высоте зуба H от скорости резания v .

1, 3 - результаты экспериментальных исследований для зубчатых колёс $m_n=3$ мм $m_n=6$ мм соответственно; 2, 4 – кривые, построенные в соответствии с зависимостью (11) для зубчатых колёс $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно.

Влияние числа зубьев нарезаемой шестерни. Исследования проводились с целью установления экспериментальным путём влияния числа зубьев нарезаемой шестерни на точность зубофрезерования.

Исследование проводилось при обработке колёс с модулями $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм с числом зубьев $z=10, 20, 30$ и 40 для $m_n=3$ мм, $z=19, 28, 37$ и 46 для $m_n=6$ мм. Скорость резания принималась равной $v=35$ м/мин. Значение подачи: $s=2$ мм/об. Все остальные условия оставались прежними.

Результаты исследований показали, что число зубьев зубчатого колеса в значительной степени влияет на его достигаемую точность. В значительной степени это влияние заметно на величине колебания длины общей нормали F_{vwr} и радиального биения зубчатого венца F_{rr} (рис. 5). Меньше влияет на размер пятна контакта по длине зуба B и по высоте зуба H и погрешность угла наклона зубьев $F_{\beta r}$. Количество зубьев нарезаемого колеса, в очень малой степени влияет на погрешность профиля зуба f_{fr} .

Сравнение результатов контрольных экспериментальных исследований и полученных с помощью математической модели согласно зависимостей (7-12) показали, что относительная погрешность составляет не более 17,5%.

Результаты исследований показали, что погрешности показателей точности зубчатого колеса с увеличением модуля возрастают. Наибольшее влияние увеличение модуля зубчатого колеса наблюдается на радиальном биении зубчатого венца F_{rr} , и на колебании длины общей нормали F_{vwr} . Наименьшее - на погрешности профиля зуба зубчатого колеса f_{fr} .

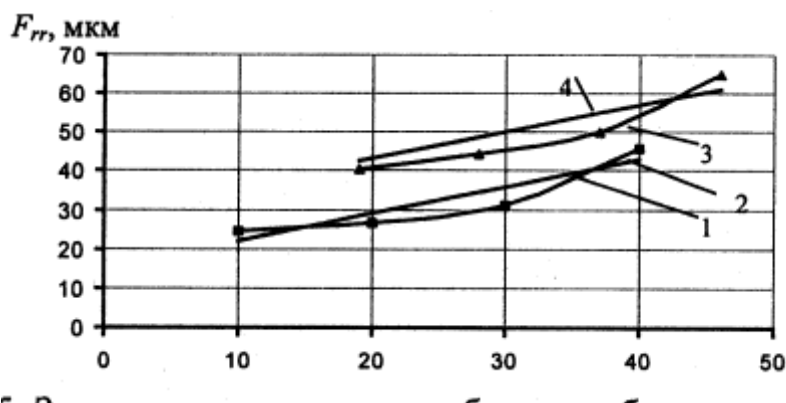


Рис 5. Зависимость радиального биения зубчатого венца F_{rr} от числа зубьев z . 1,3 - результаты экспериментальных исследований для зубчатых колёс $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно; 2, 4 - кривые построенные в соответствии с зависимостью (7) для зубчатых колёс $m_n=3$ мм и $m_n=6$ мм соответственно.

Выводы. Анализ результатов исследований позволил сделать следующие выводы:

1. Результаты экспериментальных исследований процесса зубофрезерования цилиндрических зубчатых колёс червячными фрезами дали возможность получить математическую модель для расчета и прогнозирования основных показателей точности согласно ГОСТ 1543-81, которую можно рекомендовать для использования в производственных условиях. Наибольшая относительная погрешность модели составляет 17,8%, что является допустимым для исследований такого характера.

2. Результаты исследований показали, что зубофрезерование цилиндрических зубчатых колёс червячными фрезами класса точности А даёт возможность обеспечить 7-8 степени точности согласно ГОСТ 1643-81.

3. На показатели точности зубчатых колёс наибольшее влияние оказывает подача s и модуль зубчатого колеса m_n , что даёт возможность при уменьшении их значений (подачи до $s=1$ мм/об и модуля до $m_n=2...4$ мм) достичь более высокую степень точности (6-7 согласно ГОСТ 1643-81).

Список литературы: 1. Гулида Э.Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических колёс - Львов: Изд-во при Львов. ун-те "Вища школа", 1977. - 168с. 2. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. - К.: Техника, 1975. - 168с. 3. Определение показателей надёжности цилиндрических зубчатых передач методом ускоренных испытаний.- М.: ЭНИМАШ, 1989. - 96с. 4. Пляскин И.И. Оптимизация технических решений в машиностроении. - М: Машиностроение, 1982. - 176с.