

Кане М. М.

ИЗМЕНЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН ПРИ ИХ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКЕ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь*

В статье показана актуальность изучения изменения точности зубьев цилиндрических шестерен при их отделочной обработке. Описаны условия выполненных автором экспериментальных исследований. Приведены методики проведения этих исследований и обработки их результатов. Показаны основные результаты выполненных исследований. Установлены, в частности, правомерность использования методов корреляционно-регрессионного анализа при изучении рассмотренных процессов, возможность моделирования и оптимизации этих процессов статистическими методами, пути улучшения изученных показателей точности зубьев цилиндрических шестерен после каждой из рассмотренных операций их отделки.

Назначение и особенности отделочных операций обработки зубьев цилиндрических шестерен. Цель работы. Нагруженные цилиндрические зубчатые колеса рабочих и транспортных машин в процессе изготовления проходят операцию поверхностного упрочнения зубьев. Для этой цели наиболее часто используют процессы химико-термической обработки (ХТО) или закалки зубьев токами высокой частоты (ТВЧ). Эти операции приводят к существенному уменьшению точности базовых поверхностей колес и их зубьев. Так, точность зубьев цилиндрических шестерен снижается в результате упрочнения не менее чем на 1...2 степени по ГОСТ 1643-81. Поэтому после упрочнения шестерен вводят операции отделки их базовых поверхностей и зубчатого венца. Для цилиндрических шестерен 9...11 степеней точности по ГОСТ 1643-81 для этого применяют операции обкатки или хонингования зубьев (иногда применяют обе эти операции в указанной выше последовательности для повышения стойкости зубчатых хонов). Для цилиндрических шестерен 6...8 степеней точности отделку зубьев выполняют их шлифованием. Процессы обкатки, хонингования и шлифования зубьев цилиндрических шестерен после их упрочнения и явились объектом исследования в данной работе.

Процессы обкатки и хонингования зубьев происходят в условиях свободного обката, т. е. без жесткой кинематической связи между инструментом и обрабатываемым зубчатым колесом. Обрабатываемое зубчатое колесо приводится во вращение режущим инструментом. Съем припуска происходит за счет сближения обрабатываемого колеса и инструмента в радиальном направлении в процессе обработки. Величина съема определяется прежде всего жесткостью пары инструмент-обрабатываемое колесо, зависит от большого числа

факторов и является ограниченной. Припуск на сторону для этих операций обычно находится в пределах 0,02...0,06 мм. Поэтому степень исправления исходных погрешностей в этих процессах также является ограниченной.

Процессы зубошлифования цилиндрических шестерен происходят при жесткой кинематической связи между инструментом и обрабатываемым колесом и степень исправления исходных погрешностей в этом случае должна быть высокой. Наиболее производительными и распространенными в последнее время являются методы зубошлифования цилиндрических шестерен двойным коническим кругом и червячным кругом. Эти процессы и явились объектами исследования в данной работе.

Целями работы являются уточнение возможностей указанных процессов в обеспечении точности зубьев цилиндрических шестерен, определение наиболее эффективных путей ее повышения для различных показателей точности зубьев и процессов их отделочной обработки, моделирование изучаемых процессов с целью определения требований к исходной точности зубьев, обеспечивающих необходимую точность зубьев после выполнения каждой из рассмотренных операций.

Условия и методика экспериментального изучения изменения точности зубьев цилиндрических шестерен при их отделочной обработке. Исследование было выполнено в производственных условиях Минского завода шестерен и Минского автомобильного завода. Было рассмотрено изменение таких показателей точности зубьев, как F''_{ir} , f''_{ir} , $F_{\beta r}$, $+E_{a''s}$, $-E_{a''l}$, характеризующих основные нормы точности зубьев (нормы кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев и бокового зазора). Измерения F''_{ir} , f''_{ir} , $+E_{a''s}$, $-E_{a''l}$ производились с помощью межцентромеров, измерения $F_{\beta r}$ – с помощью специальных приспособлений. Операция обкатки зубьев производилась на специальных станках с тремя обкатниками, операция зубохонингования – на станке 5В913, операция зубошлифования – на станках 5М841(конический двусторонний круг), 5В835, RZ410 (червячный круг). Обработка производилась на оптимальных для данных условий режимов резания. Объектами изучения явились цилиндрические зубчатые колеса с $m = 3...5$ мм, $z = 23...41$, изготовленные из сталей 18ХГТ, 25ХГТ, 20ХН3А. Для каждой операции обработки, материала колеса, показателя точности зубьев были исследованы не менее трех–пяти партий колес при объеме партии не менее 50 колес. Измерения показателей точности зубьев производились до и после изучаемой операции. Для обеспечения сопоставимости измерений колеса и зубья, на которых измерялись значения $F_{\beta r}$, маркировались на исходной операции. Как до, так и после изучаемой операции обработка всей партии шестерен (объем партии находился в пределах 50...100 штук) производилась на одном станке, при одной настройке инструмента. Если исходной операцией являлась операция упрочнения зубьев, то на этой операции обработка всех шестерен партии производилась на одном оборудовании при одинаковых режимах.

Основные принципы выполнения данного исследования. Методика обработки результатов. Основными особенностями выполненного исследования, отличающими его от ранее выполненных исследований, являются:

1. Кибернетический подход к решению задачи построения модели процесса изменения показателей точности зубьев шестерен после отделочных операций. Этот подход был сформулирован создателем кибернетики Н. Винером: оптимальное управление возможно при неполной информации (Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине. М.: Советское радио, 1958). Следовательно, модель процесса может быть получена при установлении надежных взаимосвязей между входами и выходами процесса без информации о механизме их взаимного преобразования. Если речь идет об изменении параметров качества деталей при их обработке, модели таких процессов могут быть получены, если установить взаимосвязи между исходными значениями этих параметров до рассматриваемой операции и их выходными значениями после этой операции.

Как показали многочисленные исследования процессов механической обработки, аналитические и эмпирические зависимости, связывающие погрешности обработки с различными параметрами технологической системы (жесткость элементов технологической системы, силы резания, припуск, режимы резания и др.) обладают ограниченной точностью т. к. технологические факторы имеют случайную природу, и эти зависимости не могут быть непосредственно использованы для построения математических моделей исследуемых процессов. При практическом использовании эти зависимости нуждаются в уточнении поправок и коэффициентов при изменении любого из включенных в эти зависимости факторов.

2. Описание исследуемой преобразующей системы с помощью полиномиальной модели. Полиномиальные модели широко используются при описании сложных диффузных систем, представляемых в виде «черного ящика» [1; 2], т. к. обладают рядом достоинств.

3. Использование методов математической статистики, в частности методов однофакторного регрессионного и корреляционного анализа. Эти методы позволяют установить степень тесноты и форму взаимосвязи между парами случайных величин, получить математическую модель преобразования исходных погрешностей на данной технологической операции, оценить достоверность полученных результатов.

4. Получение информации о характере изменения исходных значений показателей точности цилиндрических шестерен на соответствующей операции их обработки с помощью пассивного эксперимента. Условия проведения такого эксперимента в наилучшей степени соответствуют природе исследуемого процесса и позволяют использовать полученную модель процесса в реальных условиях его выполнения.

На первом этапе обработки результатов экспериментальных исследований для каждого из выбранных процессов отделочной обработки зубьев цилиндрических шестерен и для каждого из рассматриваемых показателей

точности зубьев была выполнена проверка правомерности применения корреляционно-регрессионного анализа для моделирования изменения этих показателей точности при выполнении рассматриваемых процессов обработки шестерен. Методика выполнения такого анализа показана в [3]. Она включает, в частности, анализ законов распределения изучаемых показателей точности шестерен после рассматриваемых процессов их обработки, а также оценку стационарности и эргодичности этих процессов.

Как известно, все основные критерии оценки достоверности результатов корреляционно-регрессионного анализа (КРА) (критерии Фишера, Стьюдента, χ^2 , Кохрена и др.) разработаны в предположении, что для описания распределения параметра оптимизации может быть использован закон нормального распределения. Если это условие не соблюдается, достоверность полученных результатов применения КРА не гарантируется. Нами было выполнено сравнение фактических распределений рассмотренных показателей точности зубьев шестерен из стали 25ХГТ после изученных операций для 3–5 партий колес с каждым из 5-ти теоретических распределений: нормальным (Н), логарифмически нормальным (Л), типа А (А) (Лапласа-Шарлье), Релея (Р) (Максвелла, эксцентриситета), Пирсона тип I (П), Модуля разности (M_p), размахов (P_x), равной вероятности ($P_{ав}$). Сравнение производилось с помощью критериев Пирсона и Колмогорова. Выбор указанных теоретических законов распределения был выполнен нами исходя из близости закономерностей формирования и измерения рассматриваемых показателей точности к свойствам этих распределений.

Стационарность случайного процесса предполагает постоянство во времени его основных характеристик – математического ожидания и дисперсии. Эргодичность процесса указывает на его способность сохранять указанные характеристики в повторных выборках. В производственных условиях мы определяем различные свойства технологического процесса, получаем его математическую модель по результатам измерений 1–3 выборок ограниченного объема. Если мы хотим использовать полученные результаты для управления данным процессом в производственных условиях для многих выборок неограниченного объема, этот процесс должен обладать указанными свойствами.

Последующая обработка экспериментальных данных включала следующие этапы.

1. Исключение резко выделяющихся результатов с помощью критерия Ирвина или Груббса [3].

2. Предварительная оценка формы взаимосвязи рассматриваемых параметров точности цилиндрических шестерен после операций их отделки (y) с исходными значениями этих показателей точности перед указанными операциями (x) с помощью эмпирических линий регрессии. Методика построения таких линий показана в [3].

3. Уточнение полученных взаимосвязей.

Анализ полученных линий регрессии и результатов ранее выполненных работ показал, что рассматриваемые зависимости могут быть описаны полиномом первой или второй степени:

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

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

где $\bar{x}$, $\bar{y}$ – средние арифметические значения различных показателей точности зубчатых колес до и после отделочной операции; a , b , c , d , e – постоянные коэффициенты.

Для выбора вида связи, с наилучшей точностью, описывающей исследуемые, зависимости наряду с расчетом коэффициентов уравнений (1)–(2) был определен также ряд показателей, характеризующих адекватность каждой из рассматриваемых теоретических зависимостей экспериментальным данным. Эти расчеты выполнялись для каждого из рассматриваемых показателей точности и операций отделки зубьев для 3–5 партий зубчатых колес. В качестве характеристик адекватности модели были рассмотрены следующие параметры [6]:

1. F -критерий Фишера адекватности модели.
2. Остаточная сумма квадратов S^2 .
3. Средняя относительная ошибка уравнения связи $\epsilon_{\text{ср}}$.
4. Критерий Стьюдента для оценки достоверности значений коэффициентов « b », « d » и « e » в уравнениях (1) и (2) для рассмотренных условий обработки. Расчеты производились по методике, показанной в [3].
4. Оценка степени тесноты взаимосвязи различных параметров точности после данной операции с их исходными значениями производилась путем расчета соответствующих значений коэффициентов парной корреляции r_{xy} между указанными значениями, теоретического корреляционного отношения η_t для зависимости, описываемой уравнением (2), эмпирического корреляционного отношения $\eta_{\text{э}}$. Расчеты производились с помощью ЭВМ по методикам, приведенным в [4]. Существенность в различии между $\eta_{\text{э}}$ и η_t , а также η_t и r_{xy} оценивалась с помощью критерия ξ Романовского [5]. Значимость r_{xy} проверялась с помощью t -критерия Стьюдента [3].
5. Оценка точности исследуемых параметров точности зубьев до и после операций их отделки производилась по формуле

$$\omega = 2ls, \quad (3)$$

где ω – поле рассеяния контролируемого показателя точности в данной выборке (технологический допуск на данный параметр, который может быть обеспечен на рассматриваемой операции), определенное с вероятностью γ ; l – коэффициент, зависящий от закона распределения данного показателя

точности, объема выборки N и значения γ ; s – среднее квадратичное отклонение контролируемого параметра в данной выборке.

Для нормального закона распределения, вероятности $\gamma = 0,9973$ значения l для различных N приведены в [3].

6. Степень изменения каждого из рассмотренных показателей точности зубьев после каждой из изученных отделочных операций определяли по формуле

$$V = \frac{\bar{x}}{\bar{y}}, \quad (4)$$

где V – коэффициент уточнения данного показателя точности после выполнения изучаемой операции; $\bar{x}$, $\bar{y}$ – средние арифметические значения данного показателя точности до и после рассматриваемой операции.

7. Разложение дисперсии каждого из рассмотренных показателей точности после каждой из изученных отделочных операций (s_y^2) на два слагаемых, одно из которых унаследовано с предыдущей операции (s_{yx}^2), а другое сформировалась на данной операции (δ_y^2), производилось по следующим формулам

$$s_y^2 = s_{yx}^2 + \delta_y^2, \quad (5)$$

$$s_{yx}^2 = s_y^2 (1 - r_{xy}^2), \quad (6)$$

$$\delta_y^2 = b^2 s_x^2 = (r_{xy} \cdot \frac{s_y}{s_x}) s_x^2, \quad (7)$$

$$A = \frac{s_{yx}^2}{s_y^2} 100\%, \quad (8)$$

$$B = \frac{\delta_y^2}{s_y^2} 100\%. \quad (9)$$

Здесь A и B – доли дисперсии s_y^2 данного показателя точности в % после рассматриваемой отделочной операции. Причем A возникла на рассматриваемой операции, а B – унаследована с предыдущей операции; δ_y^2 – часть s_y^2 , перенесенная с предыдущей операции; b – коэффициент уравнения (1), показывающий, какая часть $\bar{x}$ переносится на $\bar{y}$ при выполнении данной опера-

ции при описании зависимости $\bar{y} = f(\bar{x})$ полиномом первой степени. Т. е. данное разложение s_y^2 справедливо лишь при наличии линейной связи между выходными и входными значениями показателя точности на данной операции.

Полученные результаты. Их анализ. В табл. 1 приведены результаты анализа законов распределения рассмотренных показателей точности цилиндрических шестерен после выполнения изученных зубоотделочных операций.

Таблица 1 – Законы распределения показателей точности цилиндрических зубчатых колес после операций отделки зубьев

Вид обработки	Показатели точности цилиндрических зубчатых колес				
	F_{ir}''	f_{ir}''	$F_{\beta r}$	$+E_a''s$	$-E_a''i$
Зубохонингование	$\frac{H, Л, П, P_x}{A}$	$\frac{Л, Н, П, Mr, P_x}{A}$	$\frac{A, Н, P_x, П, P}{Л}$	$\frac{A, Н, П, P}{Л}$	$\frac{Л, Н, П, P}{A}$
Обкатка зубьев	$\frac{H, Л, П, P_x}{A}$	$\frac{Л, Н, P, P_x, Mr}{A}$	$\frac{A, Н, P_x, П, P}{Л}$	$\frac{A, Н, P, П}{Л}$	$\frac{Л, Н, П, P}{A}$
Зубошлифование коническим кругом	$\frac{H, Л, П, P_x}{A}$	$\frac{H, A, P, P_x, Mr}{Л}$	$\frac{Л, Н, П, P, P_x}{A}$	$\frac{Л, Н, P, П}{A}$	$\frac{A, Н, P, П}{Л}$
Зубошлифование червячным кругом	$\frac{Л, Н, P, П, P_x}{A}$	$\frac{H, Л, P, P_x, Mr}{A}$	$\frac{H, Л, P, П, P_x}{A}$	$\frac{Л, Н, П, P}{A}$	$\frac{H, Л, П, P}{A}$

Примечания: 1. Приняты следующие обозначения: Н – нормальное распределение; Л – логарифмически нормальное распределение; А – распределение типа А (распределение Грама-Шарлье); П – распределение Пирсона типа I, P_x – распределение размахов, Р – распределение Релея (Максвелла, эксцентриситета); Mr – распределение модуля разности.

2. В знаменателе дроби для каждого показателя точности и операции отделки зубьев приведено обозначение закона распределения с наибольшей точностью описывающего фактическое распределение этого показателя в рассмотренных условиях. В числителе дроби – приведены обозначения законов распределения в порядке уменьшения степени их соответствия эмпирическому распределению также пригодных, хотя и с меньшей степенью точности, для описания распределения данного показателя точности в рассмотренных условиях отделки цилиндрических шестерен.

Анализ полученных результатов, приведенных в табл. 1, а также рассчитанных нами значений критериев Пирсона $P(\chi^2)$ и Колмогорова $P(\lambda)$, позволяет сделать следующие выводы:

1. В наилучшей степени распределения рассмотренных показателей точности зубьев цилиндрических шестерен после изученных операций их

отделки описываются распределениями типа A и логарифмически нормальным распределением.

2. Для описания распределений всех рассмотренных показателей точности зубьев цилиндрических шестерен после изученных операций их отделки с достаточной точностью может быть использован также закон нормального распределения. Это свидетельствует, наряду с показанными нами стационарностью и эргодичностью рассмотренных процессов отделки зубьев шестерен, о правомерности применения корреляционно-регрессионного анализа для моделирования рассмотренных процессов отделки зубьев цилиндрических шестерен.

3. Изменение режимов обработки, характеристик оборудования при условии обеспечения требуемой точности обработки на данной операции не оказывают существенного влияния на характер распределения показателей точности зубьев на данной операции.

4. Чем в меньшей степени происходит изменение точности зубьев на данной операции по сравнению с предыдущей операцией, тем в меньшей степени распределение показателей точности зубьев подчиняется нормальному закону. Это объясняется наличием доминирующих факторов, влияющих на значения показателей точности после данной операции при незначительном изменении показателей точности после данной операции. Такими факторами являются исходные значения показателей точности зубьев перед данной операцией. Как известно, важнейшим условием распределения случайной величины по нормальному закону является влияние на изменение этой величины большого числа факторов. При этом все факторы должны влиять примерно в равной степени. Наличие доминирующих факторов имеет место при таких процессах отделки зубьев, как зубохонингование и зубообкатка, которые происходят в условиях свободного обката. Тем не менее, закон нормального распределения может быть использован для описания распределений рассмотренных показателей точности зубьев после указанных операций.

В табл. 2 приведены основные результаты расчетов статистических характеристик изменения показателей точности зубьев цилиндрических шестерен на операциях их отделки.

Значения « a » и « b » в табл. 2 – это коэффициенты уравнения (1). Остальные обозначения расшифрованы в тексте данной статьи выше.

Если в табл. 2 приведено одно значение какой-либо характеристики, то оно представляет собой среднее арифметическое соответствующих характеристик, рассчитанных для всех исследованных партий зубчатых колес. Это значение приведено в скобках. Если в какой-то графе приведены два значения, то это максимальное и минимальное значения соответствующей характеристики из всех его значений, рассчитанных для исследованных партий зубчатых колес.

Таблица 2 – Результаты расчетов характеристик изменения показателей точности цилиндрических зубчатых колес при отделке зубьев

Показатели точности зубьев	Характеристики взаимосвязи значений показателей точности после операции (у) с их исходными значениями перед данной операцией (х)						
	$x,$	$y,$	$S_x,$	$S_y,$	$V = \frac{\bar{x}}{\bar{y}}$	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8
Зубообкатка							
F_{ir}''	40–220	35–170	17–40	13–30	1,1–1,4	0,019–0,055	0,38–0,76
f_{ir}''	10–90	8–75	6–22	4–20	1,0–1,3	0,002–0,011	0,42–0,70
$F_{\beta r}$	12–80	12–80	7–15	7–13	1,0–1,4	0,003–0,023	0,33–0,97
Зубохонингование							
F_{ir}''	35–170	30–160	22–27	17–25	1,05–1,1	0,008–0,051	0,25–0,86
f_{ir}''	8–52	7–14	7–10	7–8	1,2–1,3	0,005–0,013	0,29–0,59
$F_{\beta r}$	12–75	10–65	6–12	6–10	1,05–1,3	0,001–0,012	0,47–0,99
Зубошлифование коническим двухсторонним кругом							
F_{ir}''	160–288	40–46	42–61	10–12	4–6,3	0,043–0,049	(–0,053)– –0,01
f_{ir}''	82–88	16–20	31–39	2–5	4,2–5,6	0,014–0,019	0,0058–0,018
$F_{\beta r}$	45–61	10–28	14–16	2–10	3,2–4,3	0,010–0,017	0,0088– –0,18
Зубошлифование червячным кругом							
F_{ir}''	177–300	49–56	16–56	5–14	3,2–6,1	0,048–0,050	(–0,0044)– –0,039
f_{ir}''	82–97	19–21	15–26	4–9	4,2–4,8	0,017–0,018	0,0035– –0,028
$F_{\beta r}$	59–111	10–27	7–25	2–11	4,1–5,9	0,010–0,024	0,0043– –0,033

Показатели точности зубьев	Характеристики взаимосвязи значений показателей точности зубьев после операции (y) с их исходными значениями перед операцией (x)							
	η_{ε}	η_T	r_{xy}	t_r	$\varepsilon_{cp}, \%$	F	$A, \%$	$B, \%$
1	9	10	11	12	13	14	15	16
Зубообкатка								
F_{ir}''	0,62– –0,98 (0,81)	0,58– –0,96 (0,79)	0,55– –0,94 (0,77)	4,4– –21,5 (13,3)	15–20 (13,3)	0,39– –0,73 (0,58)	11–32 (21)	68–89 (79)
f_{ir}''	0,60– –0,91 (0,77)	0,57– –0,68 (0,74)	0,54– –0,86 (0,71)	4,6–5,8 (5,2)	13–30 (21)	0,66– –0,75 (0,70)	12–40 (26)	60–88 (74)
$F_{\beta r}$	0,65– –0,99 (0,85)	0,62– –0,97 (0,81)	0,61– –0,95 (0,79)	5,1– –19,1 (12,1)	15–25 (20,2)	0,37– –0,68 (0,51)	15–31 (23)	69–85 (77)
Зубохонингование								
F_{ir}''	0,63– –0,97 (0,77)	0,60– –0,95 (0,75)	0,50– –0,93 (0,72)	4,5–38 (16,1)	9,6– –25,0 (17,7)	0,15– –0,92 (0,54)	12–31 (21)	69–88 (79)
f_{ir}''	0,55– –0,82 (0,61)	0,50– –0,80 (0,59)	0,40– –0,78 (0,57)	3,4–8,1 (6,9)	15–35 (25,1)	0,58– –0,90 (0,69)	23–41 (32)	59–77 (68)
$F_{\beta r}$	0,60– –0,91 (0,74)	0,56– –0,87 (0,72)	0,54– –0,85 (0,69)	4,6–22 (12,8)	10–27 (18,5)	0,31– –0,75 (0,53)	20–33 (26,1)	67–80 (73,9)
Зубошлифование коническим двусторонним кругом								
F_{ir}''	0,23–0,32 (0,27)	0,21–0,29 (0,25)	0,19–0,25 (0,23)	1,4–2,7 (2,1)	17–23 (20)	0,9–1,0 (0,95)	98–100 (99)	0–2 (1)
f_{ir}''	0,14–0,18 (0,16)	0,13–0,15 (0,14)	0,11–0,13 (0,12)	1,1–1,3 (1,2)	6–30 (23)	0,9–1,0 (0,95)	99–100 (99,5)	0–1 (0,5)
$F_{\beta r}$	0,22–0,37 (0,26)	0,2–0,34 (0,23)	0,1–0,32 (0,21)	1,0–2,5 (1,4)	6–40 (26)	0,9–1,0 (0,95)	90–99 (95)	1–10 (5)
Зубошлифование червячным кругом								
F_{ir}''	0,17–0,26 (0,20)	0,14–0,23 (0,17)	0,1–0,2 (0,15)	0,8–1,2 (1,0)	9–30 (19,1)	0,9–1,0 (0,95)	98–100 (99)	0–2 (1)
f_{ir}''	0,08–0,16 (0,12)	0,05–0,14 (0,08)	0,02–0,1 (0,06)	0,1–0,7 (0,4)	22–44 (33)	0,9–1,0 (0,95)	98–99 (98,5)	1–2 (1,5)
$F_{\beta r}$	0,19–0,27 (0,22)	0,17–0,23 (0,19)	0,14–0,29 (0,17)	1,0–1,6 (1,3)	12–36 (24)	0,9–1,0 (0,95)	98–100 (99)	0–2 (1)

При выборе вида взаимосвязи (см. уравнения (1) и (2)) между рассмотренными показателями точности зубчатых колес до и после исследованных операций их обработки принимались во внимание незначимость различий между значениями η_z и η_t , η_t и r_{xy} , которая оценивалась с помощью критерия ξ Романовского, низкий уровень значений ε_{cp} , для зависимости (1) ($\varepsilon_{cp} = 20,3\%$) и адекватность зависимости (1) экспериментальным данным, которая устанавливалась с помощью критерия Фишера (для всех рассмотренных показателей точности зубьев и процессов отделки шестерен $F \leq F_{кр}$, $F_{кр} = F_{1-\alpha, m_1, m_2}$. При $\alpha = 0,05$, $n = 50$, $k = 1$, $m_1 = 50$, $m_2 = 49$, $F_{0,95, 50, 49} = 1,61$. Здесь n – объем партии деталей, k – число независимых переменных в уравнении регрессии, $1-\alpha$ – вероятность достоверности оценки адекватности уравнения регрессии, $m_1 = n$, $m_2 = n - k$ – числа степеней свободы). Таким образом, установлено, что взаимосвязи рассмотренных показателей точности цилиндрических зубчатых колес после изученных зубоотделочных операций с их исходными значениями перед этими операциями с достаточной точностью могут быть описаны полиномом первой степени вида (1).

Приведем основные результаты анализа полученных данных для различных процессов отделки зубьев цилиндрических шестерен.

Обкатка зубьев цилиндрических шестерен.

1. Имеется тесная линейная взаимосвязь значений рассмотренных показателей точности зубьев цилиндрических шестерен после обкатки зубьев с их исходными значениями (для $F_{ir}'' r_{xy} = 0,55-0,94$, для $f_{ir}'' r_{xy} = 0,54-0,86$, для $F_{br} r_{xy} = 0,61-0,95$), что объясняется кинематическими особенностями данного процесса обработки зубчатых колес.

2. Большая часть погрешностей рассмотренных показателей точности цилиндрических зубчатых колес после обкатки зубьев переносится с предыдущей операции (для $F_{ir}'' b = 0,38-0,76$, $B = 68-80\%$; для $f_{ir}'' b = 0,42-0,70$, $B = 60-88\%$; для $F_{br} b = 0,33-0,97$, $B = 69-85\%$). Поэтому эффективным способом обеспечения необходимой точности зубчатых колес после обкатки зубьев является оптимизация требований к их исходной точности перед обкаткой. Это может быть выполнено по предложенной нами методике [6] с помощью уравнения (1). Если эта задача решается для конкретных условий обкатки зубьев, значения коэффициентов « a » и « b » определяются экспериментальным путем для этих условий обработки. На стадии проектирования технологического процесса изготовления зубчатого колеса могут быть использованы либо наши рекомендации, приведенные в [7], либо значения коэффициентов « a » и « b », приведенные в табл. 2.

3. Отмечаются сравнительно неплохие возможности процесса обкатки зубьев по повышению точности цилиндрических зубчатых колес (для $F_{ir}'' V = 1,1-1,4$, для $f_{ir}'' V = 1,0-1,3$, для $F_{br} V = 1,0-1,4$).

Хонингование зубьев цилиндрических зубчатых колес.

1. Установлена тесная линейная связь рассмотренных показателей точности цилиндрических зубчатых колес после зубохонингования с их исходными значениями (для $F_{ir}'' r_{xy} = 0,50-0,93$, для $f_{ir}'' r_{xy} = 0,40-0,78$, для $F_{\beta r} r_{xy} = 0,54-0,85$).

2. Большая часть дисперсии рассмотренных показателей точности зубьев после зубохонингования наследуется с предыдущей операции (для $F_{ir}'' b = 0,25-0,86$, $B = 69-88 \%$; для $f_{ir}'' b = 0,29-0,59$, $B = 59-77 \%$; для $F_{\beta r} b = 0,47-0,99$, $B = 67-80 \%$). Поэтому эффективным способом обеспечения необходимой точности зубьев после зубохонингования является выбор оптимальных требований к их исходной точности перед зубохонингованием. Возможные способы решения этой задачи показаны выше применительно к процессу обкатки зубьев.

3. В лучшей степени при зубохонинговании улучшаются значения характеристик плавности работы зубчатых колес (для $f_{ir}'' V = 1,2-1,3$) и контакта зубьев (для $F_{\beta r} V = 1,05-1,3$). В худшей степени – характеристики кинематической точности (для $F_{ir}'' V = 1,05-1,1$).

Шлифование зубьев цилиндрических зубчатых колес.

1. Зубошлифование эффективно улучшает точность зубчатых колес (для рассмотренных показателей точности $V = 3,2-6,3$). При этом характеристики точности после зубошлифования весьма слабо связаны с их исходными значениями (для $F_{ir}'' r_{xy} = 0,1-0,26$, для $f_{ir}'' r_{xy} = 0,02-0,13$, для $F_{\beta r} r_{xy} = 0,1-0,32$).

2. Зубошлифование коническим двусторонним кругом в несколько лучшей степени исправляет характеристики кинематической точности и плавности работы (для $F_{ir}'' V = 4-6,3$, $B = 0-2 \%$; для $f_{ir}'' V = 4,2-5,6$, $B = 0-1 \%$) по сравнению с зубошлифованием червячным кругом (для $F_{ir}'' V = 3,2-6,1$, $B = 0-2 \%$; для $f_{ir}'' V = 4,2-4,8$, $B = 1-2 \%$), однако в худшей степени исправляет погрешность направления зубьев $F_{\beta r}$ (для конического круга $V = 3,2-4,3$, $B = 1-10 \%$; для червячного круга $V = 4,1-5,9$, $B = 0-2 \%$).

3. Хотя взаимосвязи показателей точности зубчатых колес после зубошлифования с их исходными значениями до зубошлифования с достаточной точностью могут быть описаны полиномом первой степени ($\varepsilon_{cp} = 9-36 \%$, $F = 0,9-1,0$), оптимизация исходных значений показателей точности зубьев перед зубошлифованием не оказывает существенного влияния на значения показателей точности зубьев после зубошлифования. Большая часть дисперсии рассмотренных показателей точности зубьев после зубошлифования возникает на самой операции зубошлифования (для $F_{ir}'' A = 98-100 \%$, для $f_{ir}'' A = 96-100 \%$, для $F_{\beta r} A = 90-100 \%$). Поэтому основным путем обеспечения необходимой точности зубьев цилиндрических шестерен после зубошлифования является совершенствование самого процесса зубошлифования.

Выводы. 1. Показана правомерность моделирования зубоотделочных операций (зубообкатки, зубохонингования, зубошлифования по двум схе-

мам) при обработке цилиндрических шестерен в производственных условиях с помощью статистических методов, в том числе-методов корреляционно-регрессионного анализа.

2. Установлены закономерности и характеристики пооперационного изменения 3-х основных показателей точности зубьев цилиндрических шестерен (F_{ir}'' , f_{ir}' , $F_{\beta r}$) на указанных операциях отделки зубьев после их химико-термической обработки. Эти данные позволяют оценить точностные возможности изученных процессов отделки зубьев, выполнить оптимизацию требований к исходной точности зубьев перед проведением рассмотренных операций.

3. Определены основные направления обеспечения точности зубьев цилиндрических шестерен при выполнении рассмотренных зубоотделочных операций. Для процессов зубообкатки и зубохонингования этого можно достичь оптимизацией требований к исходной точности зубьев перед выполнением этих операций. Для процессов зубошлифования это достигается совершенствованием самих процессов зубошлифования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Налимов, В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – М.: Наука, 1971.
2. Точность производства в машиностроении и приборостроении. – Под ред. А. Н. Гаврилова. – М.: Машиностроение, 1973.
3. Кане, М. М. Основы исследований, изобретательства и инновационной деятельности в машиностроении: учебник / М. М. Кане. – Минск: Вышэйшая школа, 2018.
4. Митропольский, А. К. Техника статистических вычислений / А. К. Митропольский. – М.: Наука, 1971.
5. Райбман, Н. С. Корреляционные методы определения характеристик сложных взаимосвязанных комплексов / Н. С. Райбман. // Приборостроение и средства автоматизации: справочник. – Т. 1. Под общ. ред. А. Н. Гаврилова. – М.: Машгиз, 1963.
6. Кане, М. М. Статистический анализ изменения параметров точности цилиндрических зубчатых колес при шевинговании / М. М. Кане // Вестник машиностроения. – 1980, № 5: С. 24–27.
7. СТБ 1251 – 2000. Государственный стандарт Республики Беларусь. Колеса зубчатые цилиндрические. Методы проектирования технологических процессов изготовления. Госстандарт. Минск. 2001.

Поступила 31.10.2024