

СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Рассмотрены закономерности изменения основных показателей точности посадочного отверстия, опорного при зубонарезании торца и зубчатого венца цилиндрических зубчатых колес на операциях их обработки. Описана структура и возможности разработанного с учетом этих закономерностей СТБ 1251-2000. Государственный стандарт Республики Беларусь. Колеса зубчатые цилиндрические. Методы проектирования технологических процессов изготовления. Госстандарт. Минск.

Как известно, при изготовлении деталей машин на большинстве операций их обработки имеет место закономерное изменение параметров качества деталей. Это явление называют технологической наследственностью. На некоторых операциях существуют технологические факторы, имеющие основное значение при формировании различных параметров качества деталей. Использование этих явлений при проектировании процессов изготовления деталей машин позволит повысить эффективность процессов обработки и качество продукции. Особенно продуктивно использование этих явлений при проектировании процессов изготовления сложных деталей, содержащих ряд операций обработки. К таким деталям относятся, например, цилиндрические зубчатые колеса.

Технологические процессы обработки зубьев и базовых поверхностей цилиндрических зубчатых колес содержат от 3 до 5 соответствующих операций.

Анализ технологических процессов отделки и упрочнения зубьев, обработки базовых поверхностей цилиндрических зубчатых колес показывает, что при этих

операциях могут иметь место закономерные изменения показателей точности колес, поддающиеся математическому моделированию. Процессы отделки и упрочнения зубьев происходят либо при свободном обкатывании (шевингование, зубообкатка, зубохонингование), либо без снятия припуска (химико-термическая обработка (ХТО), зубообкатка), либо при удалении минимальных припусков (зубошлифование), когда могут иметь место определенные взаимосвязи между показателями точности до и после указанных операций. При обработке базовых поверхностей колес (отверстия и торцы венца) также следует ожидать этих взаимосвязей ввиду малой жесткости технологической системы на этих операциях.

Для изучения этих взаимосвязей были выполнены обработка и измерения 65 партий цилиндрических зубчатых колес в производственных условиях и 20 партий зубчатых колес в лабораторных условиях. Было исследовано изменение 11 показателей точности зубьев на таких операциях их обработки, как шевингование на жесткой и разжимной оправке, цементация и нитроце-

ментация в безмуфельном агрегате (БМА), зубохонингование, обкатка зубьев тремя обкатниками, зубошлифование коническим и червячным кругами. Рассматривалось также изменение 5 показателей точности базовых поверхностей колес на таких операциях их обработки, как сверление, зенкерование, однократное, черновое и чистовое протягивание, тонкое растачивание, хонингование, шлифование, нитроцементация и цементация, дробеструйная обработка и дорнование отверстия, черновое, получистовое, чистовое точение, нитроцементация и цементация, шлифование торцов венца.

Обрабатывались зубчатые колеса с $m = 2,0 \sum 6,0$ мм, $z = 23 \sum 51$ с гладким и шлицевым посадочными отверстиями $D_0 = 25 \div 70$ мм из сталей 40Х, 45, 18ХГТ, 25ХГТ, 12ХНЗА и др., которые охватили около 90% типоразмеров колес, изготавливаемых в авто-, тракторной и станкостроении.

На всех операциях обработки проводили на оптимальных, согласно имеющимся рекомендациям, режимах резания, в условиях соответствия оборудования и оснастки требованиям нормативно-технической документации. Вначале были проанализированы законы распределения выбранных показателей точности колес, исследованы стационарность и эргодичность рассмотренных процессов обработки зубчатых колес для указанных показателей точности. Были установлены законы распределения, позволяющие с наибольшей точностью описать фактические распределения показателей точности колес после различных операций их обработки. Показано, что закон нормального распределения также может быть использован для описания рассмотренных распределений.

Установлено, что все изученные процессы обработки колес в

рассмотренных условиях являются стационарными и обладают эргодическим свойством. Это позволяет получить статистическую модель каждого из изученных процессов по результатам измерений одной выборки достаточной продолжительности.

Анализ полученных результатов для каждого из рассмотренных показателей точности и процессов обработки цилиндрических зубчатых колес включал решение двух задач:

1. Определение формы и достоверности взаимосвязи $y = f(x)$, где x, y — значения показателя точности до и после данной операции.

2. Определение степени изменения показателя y на данной операции и степени тесноты его взаимосвязи с исходным значением x перед данной операцией.

Предварительная обработка экспериментальных данных заключалась в исключении резко выделяющихся результатов с помощью критериев Ирвина или Груббса, а также в выполнении фазового анализа показателей кинематической точности цилиндрических зубчатых колес ($F_{ir}', F_{ir}'', F_{pr}', F_{pr}''$). Этот анализ проводился с помощью совмещенных графиков изменения этих показателей по зубчатому венцу до и после изучаемой операции. Было установлено, что для рассмотренных процессов обработки зубьев для 82 \sum 99,2% зубчатых колес не происходит изменения по фазе на угол $\geq 180^\circ$ указанных показателей кинематической точности. Это указывает на правомерность оценки характера пооперационного изменения этих показателей с помощью статистического анализа взаимосвязей между их абсолютными значениями до и после соответствующих операций.

Для предварительной оценки формы и тесноты связи различных показателей точности цилиндрических

зубчатых колес после изучаемых операций с их исходными значениями по полученным опытным данным были построены эмпирические линии регрессии. Анализ этих линий, а также результатов ранее выполненных работ показал, что для описания взаимосвязи $y = f(x)$ могут быть использованы полиномы 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 значения рассматриваемых показателей точности до и после данной операции; a, b, c, d, e — постоянные в данных условиях коэффициенты.

Вид связи, с наибольшей точностью описывающей изучаемые зависимости, выбирали с помощью средней относительной ошибки уравнения связи ϵ_{cp} , критерия Фишера F адекватности модели, сравнения эмпирического η_e и теоретического η_t (для зависимости (2) корреляционных отношений), а также сравнения η_e с коэффициентом корреляции r_{xy} с помощью критерия ζ Романовского.

Выполненные расчеты показали, что для всех рассмотренных показателей точности и операций обработки цилиндрических зубчатых колес пооперационное изменение этих показателей может быть с достаточной точностью ($\epsilon_{cp} = 1 \div 40\%$) описано уравнением (1).

Для оценки возможной степени изменения каждого из рассмотренных показателей точности зубчатых колес на различных операциях обработки были произведены расчеты коэффициента уточнения V :

$$V = \bar{x} / \bar{y}.$$

Здесь \bar{x}, \bar{y} — средние арифметические значения данного показателя точности до и после i -й операции.

С целью установления общих закономерностей образования погрешностей исследованных показателей точности на рассматриваемых операциях нами было выполнено разложение дисперсии S_y^2 этих показателей после каждой из изученных операций на две части S_{yx}^2 и δ_{yx}^2 . Значение δ_{yx}^2 характеризует влияние исходных погрешностей на S_y^2 , значение S_{yx}^2 — влияние прочих факторов.

$$\begin{aligned} S_y^2 &= S_{yx}^2 + \delta_{yx}^2 = \\ &= S_y^2 (1 - r_{xy}^2) + b^2 S_y^2 = \\ &= S_y^2 (1 - r_{xy}^2) + \\ &+ (r_{xy} \cdot S_y / S_x)^2 \cdot S_x^2 \quad (3) \end{aligned}$$

Определив затем значения A и B , можно установить часть дисперсии S_y^2 , которая возникает на самой рассматриваемой операции (A) и часть, унаследованную с предыдущей операции (B).

$$A = S_{yx}^2 / S_y^2 \cdot 100; \quad (4)$$

$$B = \delta_{yx}^2 / S_y^2 \cdot 100. \quad (5)$$

Аналогичный физический смысл имеют и коэффициенты «а» и «b» в уравнении (1). Только они характеризуют части средних арифметических значений \bar{x} и \bar{y} показателя точности после (\bar{y}) и до (\bar{x}) данной операции. Основные результаты расчетов, выполненных с помощью ЭВМ, приведены в наших работах [1, 2, 3]. Их анализ позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Пооперационное изменение всех рассмотренных показателей колес на изученных операциях их изготовления с достаточной точностью ($\epsilon_{cp} = 1+40\%$) может быть описано полиномом первой степени.

2. Для большинства рассмотренных показателей точности колес и операций их обработки имеет место технологическое наследование точности ($B = 10+99\%$).

В этих условиях для обеспечения точности колеса на данной операции необходим обоснованный выбор и обеспечение точности колеса на предшествующей операции. Исключения составляют процесс зубошлифования, показатели плавности работы колеса при шевинговании, показатели точности формы посадочного отверстия колеса при протягивании отверстия.

3. Значения показателей точности колес до и после каждой из рассмотренных операций, характеристики пооперационных взаимосвязей между этими показателями зависят от многих факторов (состояния технологической системы, припусков, режимов резания и др.) и изменяются в широких пределах (70%–100%). Поэтому наиболее точное описание указанных взаимосвязей в данных условиях возможно лишь статистическими методами по результатам эксперимента в этих условиях.

4. Полученные данные позволяют объективно оценить точностные возможности различных процессов обработки колес и выбрать маршрут обработки колеса.

Установлено, например, что шевингование на разжимной оправке позволяет на 10+25% повысить точность зубьев по сравнению с шевингованием на жесткой оправке; что нитроцементация колес вызывает на 2+10% меньшие деформации зубьев, чем цементация; что по степени уменьшения изменения при ХТО рассмотренные показатели точности зубьев могут быть расположены в следующем порядке: $F_{br}, f_{br}''', F_{r'}, F_{r}''', F_{vwr}$; что зубошлифование коническим кругом в несколько большей степени исправляет показатели кинематической точности и плавности работы и в меньшей степени — погрешность направления зубьев по сравнению с зубошлифованием червячным кругом и т. д.

В результате данного исследования нами были предложены методы и рекомендации по выбору маршрутов обработки зубьев и базовых поверхностей цилиндрических зубчатых колес и требований к их точности на промежуточных операциях [3, 4].

Выбор маршрута обработки следует производить из условия (6). Наличие технологического наследования значений параметров качества зубчатых колес на основных операциях их обработки дает основание считать технически допустимым такой процесс изготовления зубчатого колеса, который обеспечивает для каждого из нормируемых по чертежу готовой детали параметров качества соблюдение условия:

$$K_{из.об.} \leq \prod_{i=1}^m K_{из.i}, \quad (6)$$

где $K_{из.об.}$ — общий коэффициент изменения параметра при реализации технологического процесса; $K_{из.i}$ — коэффициент изменения данного параметра на i -й операции; m — число операций технологического процесса, на которых происходит обработка поверхности, характеризуемой данным параметром качества.

$$K_{из.об.} = \delta_{заг.} / \delta_{ca}, \quad (7)$$

где $\delta_{заг.}$ — допуск на данный параметр качества в заготовке или на первой операции, где возникает поверхность (например, зубья колеса), которую характеризует данный параметр качества; δ_{ca} — служебный допуск на данный параметр по чертежу готового зубчатого колеса.

$$K_{из.i} = \delta_{i-1} / \delta_i, \quad (8)$$

где δ_{i-1} и δ_i — допуски на данный параметр качества на предшествующей ($i-1$) и данной (i) операциях, которые могут быть обеспечены рассматриваемыми методами обработки.

Методика экспериментально-го определения допусков δ_i для

показателей точности зубчатых колес приведена в [4]. Значения коэффициентов $K_{из.1}$ для исследованных показателей точности и процессов обработки зубчатых колес приведены в [3, 4].

При выборе этих коэффициентов могут быть учтены состояние оборудования и конструкция колеса.

Выбор требований к точности цилиндрических зубчатых колес на промежуточных операциях их обработки может быть произведен при проектировании процессов их обработки с помощью таблиц, приведенных в [4], а при отладке этих процессов — по методике, описанной в [3].

Точность зубьев цилиндрических шестерен в основном формируется при зубофрезеровании. Для колес, подвергнутых шевингованию, ХТО, зубохонингованию или зубообкатке, до 54% дисперсии отдельных параметров качества зубьев наследуется с операции зубофрезерования. Одним из основных факторов, определяющих точность зубьев при их нарезании, является точность базовых поверхностей колеса. Этот фактор обеспечивает до 80% погрешностей F_{br} и F_{ir} обработанных колес [5].

В тоже время выбор требований к точности базовых поверхностей цилиндрических зубчатых колес до недавнего времени не регламентировался какими-либо нормативными документами и производился на основе либо производственного опыта, либо рекомендаций различных авторов. Эти данные весьма противоречивы. Поэтому, например, требования к допустимому биению торца венца δT колес, близких по размерам ($d_a = 200$ мм) и требуемой точности (8 степень по ГОСТ 1643-81), по действующим на различных предприятиях СНГ технологическим процессам отличаются до 7,5 раз, а по рекомендациям различных работ — до 2,75 раз.

Нами выполнено обширное экспериментальное исследование влияния 3 показателей точности баз колеса (диаметрального зазора ΔD_0 в сопряжении «оправка зубофрезерного станка — обрабатываемое колесо», биения опорного торца заготовки E_r , радиального биения заготовки E_r) на 14 показателей точности зубчатого венца при зубофрезеровании, зубодолблении и шевинговании. Было обработано и измерено 60 партий колес в производственных и 20 партий колес — в лабораторных условиях. Это дало возможность охватить почти 90% типоразмеров колес изучаемых передач и получить достоверные результаты.

Вначале было выполнено исследование степени тесноты взаимосвязей рассмотренных показателей точности зубьев с показателями точности базовых поверхностей цилиндрических шестерен при зубофрезеровании. Для этого для каждой партии колес и каждого показателя точности зубьев были рассчитаны коэффициенты парной и множественной корреляции с показателями точности базовых поверхностей колес и оценена достоверность этих коэффициентов.

Было установлено:

1. Поскольку разброс характеристик степени тесноты рассматриваемых взаимосвязей составил 150Σ600%, наиболее точное их описание может быть получено лишь экспериментальным путем с помощью статистических методов.

2. Влияние E_r на подавляющее большинство показателей точности зубчатого венца для рассмотренных видов и условий обработки несущественно.

3. В наибольшей степени погрешности баз заготовок (E_r , ΔD_0) влияют на кинематические погрешности и погрешности контакта зубьев. Отмечено некоторое влияние E_r , ΔD_0 и на пока-

затели плавности работы, которое имеет косвенный характер.

4. Погрешности баз заготовок в большой степени определяют точность зубьев при зубонарезании. Доля погрешностей баз при зубонарезании в дисперсии F_{ir}' достигает 54%, F_{pr} — 72%, F_{ir} — 57%, F_{br} — 62% и т.д.

5. Повышение точности и жесткости зуборезного оборудования увеличивает степень влияния баз заготовок на точность зубообработки.

6. Шевингование значительно уменьшает степень влияния базовых поверхностей заготовок на различные показатели точности зубчатого венца по сравнению с зубонарезанием. Причем для шевингования на разжимной оправке это отмечается в большей степени, чем для шевингования на жесткой оправке.

Затем для 10 показателей точности зубчатого венца в производственных условиях и 8 показателей точности в лабораторных условиях, наиболее тесно связанных с погрешностями базовых поверхностей заготовок, был выполнен выбор формы этих связей. Анализ эмпирических линий регрессии $y = f(X_1, X_2)$ и природы изучаемых процессов показал, что могут иметь место 4 вида зависимостей между изучаемыми параметрами. Выполненные расчеты показали, что для описания взаимосвязей $F_{ir}', F_{pr}, F_{ir}, F_{ir}'', F_{ir}', f_{ir}'', f_{pr}, F_{br}, +E_{a's}, -E_{a'i}$ с показателями точности баз заготовок для рассмотренных видов и условий обработки может быть с достаточной точностью ($\epsilon_{cp} = 12...26\%$) использована зависимость:

$$y = a_0 + a_1 E_r + a_2 \Delta D_0, \quad (9)$$

где y — один из показателей точности зубчатого венца.

Нами предложена методика определения максимально допустимых и оптимальных для данных условий обработки требований к точности базовых по-

верхностей зубчатых колес, обеспечивающих необходимые значения показателей кинематической точности и контакта зубьев [6], и выполнены соответствующие расчеты для полученных экспериментальных данных.

Было установлено, что на операциях зубофрезерования и зубодобления к точности базовых поверхностей заготовок предъявляются более жесткие требования, чем при шевинговании. Поэтому выбор требований к точности баз заготовок перед зубообработкой необходимо выполнять для операции зубонарезания.

Имеющиеся у нас экспериментальные данные для широкой номенклатуры типоразмеров зубчатых колес, различных условий зубонарезания позволили найти взаимосвязи максимально допустимых при зубонарезании значений торцевого биения заготовки δT и диаметрального зазора δD_0 в сопряжении «нарезаемое колесо — оправка зуборезного станка» с геометрическими размерами и точностью нарезаемых колес: шириной венца $b(X_1)$, наружным диаметром венца $d_a(X_2)$, отношением длины посадочного отверстия к диаметру опорного при зубонарезании торца $L_0/D_{on}(X_3)$, минимальной степени точности колеса после зубонарезания по ГОСТ 1643-81 (X_4), диаметром отверстия колеса $D_0(X_5)$. Были получены с помощью ЭВМ указанные зависимости для шестерен автотракторных трансмиссий и металлорежущих станков. Для шестерен автотракторных трансмиссий они имеют вид:

$$\begin{aligned} \delta T = & (82661 + 145514X_3 - \\ & - 43358X_4 + 2115 \cdot 10^{-2}X_1^2 + \\ & + 160 \cdot 10^{-2}X_2^2 - 118250X_3^2 + \\ & + 7058X_4^2 - 52 \cdot 10^{-2}X_5^2 - \\ & - 46 \cdot 10^{-4}X_2^3 + 15063X_3^3 - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - 285X_4^3 - 295X_1X_4 - \\ & - 278X_2X_3 + 412X_3X_5 + \\ & + 15X_2X_4) \cdot 10^{-6}, \text{ мм} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta D_0 = & (1810689 - 118650X_5 + \\ & + 83765X_3 + 2354X_5^2 + 88X_4^3 - \\ & - 1439 \cdot 10^{-2}X_5^3 - 665X_1X_3 - \\ & - 12630X_3X_4 + 154X_4X_3 + \\ & + 452 \cdot 10^{-3}X_2^2) \cdot 10^{-6}, \text{ мм} \quad (11) \end{aligned}$$

Эти зависимости, объясняющие от 92,5 до 97,5% дисперсии δT и δD_0 , а также полученные с их помощью таблицы, могут быть использованы при проектировании процессов изготовления зубчатых колес, а названная выше методика определения δT и δD_0 по результатам эксперимента — при отладке процесса зубонарезания.

Полученные результаты описанных исследований процессов изготовления цилиндрических зубчатых колес легли в основу разработанного нами стандарта Республики Беларусь СТБ 1251-2000 «Колеса зубчатые цилиндрические. Методы проектирования технологических процессов изготовления» [4]. Требования данного стандарта являются рекомендуемыми. Они могут уточняться при отладке спроектированного процесса при изготовлении 2...3 установочных партий колес. При этом могут использоваться предложенные нами методики выбора маршрутов обработки поверхностей, требований к их точности на промежуточных операциях, оптимизации требований к точности базовых поверхностей цилиндрических шестерен [3, 4, 6].

Последовательность проектирования технологического процесса изготовления цилиндрического зубчатого колеса с помощью СТБ 1251-2000 показана на рис. 1. При решении задач 1, 4 используется условие (6) и таблицы значений $K_{из.1}$ — для показателей точности и операций обработки зубьев и базовых поверхностей цилиндрических шестерен. При решении задач 2, 5 используются таблицы, в которых для различных процессов и точности обработки зубьев и базовых поверхностей колес приве-

данные. Методы проектирования технологических процессов изготовления» [4]. Требования данного стандарта являются рекомендуемыми. Они могут уточняться при отладке спроектированного процесса при изготовлении 2...3 установочных партий колес. При этом могут использоваться предложенные нами методики выбора маршрутов обработки поверхностей, требований к их точности на промежуточных операциях, оптимизации требований к точности базовых поверхностей цилиндрических шестерен [3, 4, 6].

Последовательность проектирования технологического процесса изготовления цилиндрического зубчатого колеса с помощью СТБ 1251-2000 показана на рис. 1. При решении задач 1, 4 используется условие (6) и таблицы значений $K_{из.1}$ — для показателей точности и операций обработки зубьев и базовых поверхностей цилиндрических шестерен. При решении задач 2, 5 используются таблицы, в которых для различных процессов и точности обработки зубьев и базовых поверхностей колес приве-

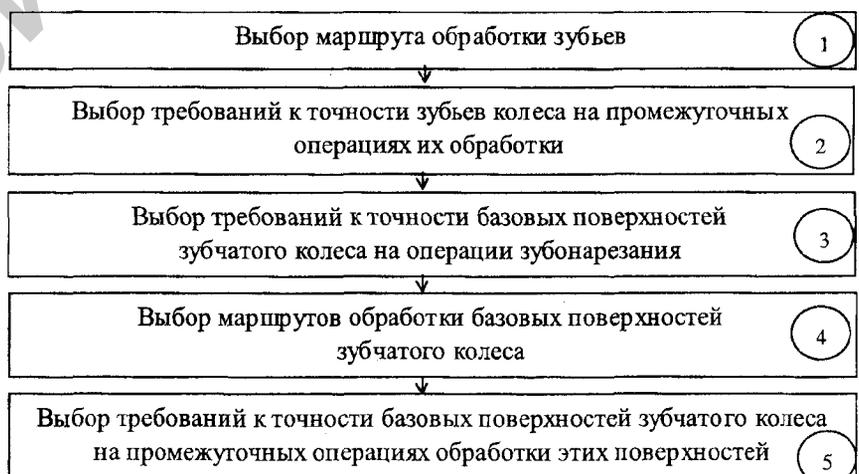


Рис. 1. Последовательность проектирования технологического процесса изготовления цилиндрического зубчатого колеса с помощью СТБ 1251-2000

дены интервалы допустимых исходных значений изученных показателей точности. При построении этих таблиц использовалась предложенная нами методика определения рациональной исходной точности параметра перед данной операцией с учетом линейной взаимосвязи средних арифметических значений этого параметра до и после операции (зависимость (1)) [3]. При решении задачи 3 используются зависимости (10) и (11) или таблицы, полученные с их помощью.

Обработку базовых поверхностей зубчатых колес рекомендуется разбить на 2 этапа:

■ первый этап — до операции зубонарезания зубчатого колеса;

■ второй этап — после упрочнения зубчатых колес, если эта операция предусмотрена.

Выбор маршрутов обработки базовых поверхностей для каждого из этих этапов производится самостоятельно, начиная с первого этапа. При расчете $K_{из.об}$ по формуле (7) в качестве $\delta_{зар}$ для первого этапа обработки принимаются допуски на биение торца венца δT и диаметр посадочного отверстия колеса δD_0 в заготовке; для второго этапа — допуски на эти же показатели точности зубчатого колеса при зубонарезании. В качестве $\delta_{сх}$ (7) для первого этапа обработки принимаются допуски δT и δD_0 при зубонарезании; для второго этапа — значения δT и δD_0 , указанные в чертеже готовой детали.

СТБ 1251-2000 содержит также 9 Приложений. Их основное назначение: дать информацию о современных методах, оборудовании, оснастке, их точностных возможностях при обработке зубьев и базовых поверхностей

цилиндрических шестерен; расширить возможности решения поставленных задач для типоразмеров и точности шестерен, не рассмотренных в наших исследованиях; облегчить использование стандарта. Для реализации последней задачи в Приложениях приведены примеры применения данного стандарта на различных этапах проектирования технологического процесса изготовления цилиндрического зубчатого колеса.

Применение настоящего стандарта по сравнению с известными методами проектирования технологических процессов позволяет повысить надежность спроектированного процесса с точки зрения обеспечения требуемого качества цилиндрических зубчатых колес, ускорить процесс проектирования и отладки технологического процесса, уменьшить расходы на указанные проектирование и отладку, повысить качество и эксплуатационные характеристики продукции. Это объясняется следующими особенностями рассматриваемого стандарта:

1. При выборе маршрутов обработки зубьев и базовых поверхностей цилиндрических шестерен, требований к их точности на промежуточных операциях учитывается характер пооперационного изменения показателей их точности.

2. При выборе требований к точности базовых поверхностей зубчатых колес учитывается степень их совместного влияния на важнейшие показатели точности зубьев при зубонарезании.

3. При решении всех технологических задач учитываются состояние имеющегося оборудования,

особенности конструкции изготавливаемого зубчатого колеса.

Нам кажется перспективным выполнение подобных исследований и разработка аналогичных стандартов, регламентирующих методы проектирования технологических процессов изготовления других сложных, ответственных и массовых деталей машин.

Литература

1. Кане М.М. Статистический анализ изменения параметров точности цилиндрических зубчатых колес при шевинговании // Вестник машиностроения, 1980, — №5. — С. 24–26.
2. Кане М.М. Точность отверстий и торцов венцов цилиндрических зубчатых колес при механической обработке // Вестник машиностроения, 1987, — № 6. — С. 50–52.
3. Кане М.М. Выбор рациональной точности цилиндрических зубчатых колес на различных операциях их обработки // Вестник машиностроения. — 1996. — № 8. — С. 3–8.
4. СТБ 1251-2000. Государственный стандарт Республики Беларусь. Колеса зубчатые цилиндрические. Методы проектирования технологических процессов изготовления. Госстандарт. Минск.
5. Эстерзон М.А., Бенкин В.А. Анализ точности обработки одновенцовых цилиндрических зубчатых колес на автоматической линии. — М.: ЭНЙМС. — 1961.
6. Кане М.М., Яковлев Г.М., Алешкевич И.Л. Вероятностно-статистический анализ влияния базовых поверхностей заготовок цилиндрических зубчатых колес на точность зубообработки // Вестник машиностроения. — 1974. — № 10. — С. 46–50.

Рецензент: доктор технических наук, старший научный сотрудник О.Г. ДЕВОЙНО