

УДК 621.01

¹А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф., ¹В. Б. Котляров, аспирант,

¹С. Б. Котляров, инженер, ²Б. С. Котляров, канд. техн. наук.

¹Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

²Ялта, Россия

Тел.: +7(988)-55-40-021; +7(985) 021-79-06, +7(964) 704-53-62;

E-mail: mntk21@mail.ru; velidarkotlarov@mail.ru; boris.kotlyarov@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОТ-ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОД ФИНИШНЫЕ ОПЕРАЦИИ НАПЫЛЕНИЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ПРИПУСКОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ МЕХАНООБРАБОТКИ

В настоящей работе приведено описание результатов проведенных исследований относительно способов формирования геометрии и поверхностных свойств обрабатываемых деталей согласно требованиям КД - конструкторской документации деталей на основе применения ФОТ-воздействий. В работе приводится подход при применении ФОТ-воздействий для формирования бочкообразных зубьев блок-вала колес КПП, позволяющий вести расчет припусков для реализации финишных операций, например, под шевингование, в качестве подготовленной поверхности для финального формирования поверхностных свойств и геометрии и величины бочкообразности методом напыления.

Ключевые слова: деталь, часть, участок, зона, функция, обрабатываемая поверхность, припуск, фрезерование, ФОТ- воздействие, бочкообразность, шевингование, напыление поверхности.

A. N. Mihailov, B. S. Kotlyarov, V. B. Kotliarov, S. B. Kotliarov

OPTIMIZATION OF THE PHOTO-PROCESS OF PREPARATION OF MODIFIED SURFACES FOR FINISHING OPERATIONS BY SPUTTING AND DETERMINATION OF ALLOWANCES OF PRELIMINARY MACHINING

This paper describes the results of the studies carried out on the methods of forming the geometry and surface properties of the processed parts in accordance with the requirements of design documentation - design documentation of parts based on the use of FOT-effects. The paper presents an approach to the use of FOT-actions for the formation of barrel-shaped teeth of the block-shaft of the gearbox wheels, which makes it possible to calculate the allowances for the implementation of finishing operations, for example, for shaving, as a prepared surface for the final formation of surface properties and geometry and the value of barrel-shapedness by the spraying method.

Keywords: part, part, area, zone, function, surface to be treated, allowance, milling, PHOT-impact, barrel-shaped, shaving, surface spraying.

1. Введение

Одной из важных задач при производстве изделий и изготовлении деталей машин и механизмов машиностроительной сферы является минимизация затрат времени и материальных ресурсов для достижения требуемых параметров машин [1, 2]. Основной путь решения этой задачи в механообработке - это снижение машинного и вспомогательного времени обработки деталей. Такой эффект достижим за счет известного подхода создания рациональной формы и геометрии заготовок на предварительном этапе и формирования такого алгоритма обработки, при котором большая часть припуска снимается на начальных операциях, и минимизируется припуск для выполнения финишных операций. Важно правильно решать такие задачи при обработке деталей, имеющих закрытые контуры [3, 4], которые не позволяют выбирать широкий спектр оборудования и инструментов для процессов

формообразования и создания требуемых свойств поверхностей и материала для отдельных элементов, частей и зон деталей.

В настоящей работе рассмотрен вариант механической обработки модифицированных участков зубчатых венцов блок-вала ведомых колес, применяемых в КПП, работающих без разрыва потока передаваемой мощности [5, 6, 7, 8].

При этом исследования проведены для обработки бочкообразных зубьев [9, 10] ограниченного углового сектора с учетом эффективного формообразования заготовки, снятия максимального припуска на начальных операциях. Приведена система и алгоритм расчета припуска для осуществления финишной операции формообразования методом шевингования, и финальной аддитивной операции формообразования и с одновременным формированием требуемых поверхностных свойств методом напыления.

2. Цель и задачи

Цель настоящей работы заключается в создании функционально-ориентированного системного подхода к разработке технологии изготовления сложных в геометрическом и технологическом отношении деталей, имеющих ограниченный спектр использования существующих на предприятии технических средств и наличного станочного парка.

Развить применение разработанного ранее формализованного отображения функционально-ориентированных взаимосвязей конструктивных признаков элементов детали и технологических эффектов ФОТ-воздействий для разработки алгоритма создания комплексной технологии, позволяющей обрабатывать модифицированные бочкообразные зубья на топологически ограниченном участке зубчатого венца блока-вала колес.

Привести методику и систему расчета величин припусков для обработки фрезеруемой боковой поверхности бочкообразных зубьев, оставляемых для осуществления финишной операции шевингованием.

Полученная таким образом боковая поверхность модифицированных зубьев становится основанием для осуществления следующей аддитивной технологической операции методом напыления с использованием карбидов твердых металлов, завершающей окончательное формирование геометрии поверхности и поверхностных свойств зубьев на ограниченном участке и в заданных координатных зонах детали.

3. Основное содержание и результаты работы

Поставленная цель достигается тем, что на основании результатов проведенных ранее исследований [4, 6, 7, 8,] установлен формализованный образ целевой функции на примере детали блок-вал колес КПП без разрыва потока передаваемой мощности.

Синтез структурной схемы технологического процесса обработки с применением частных схем ФОТ-воздействия и поиск оптимального варианта формирования свойств детали можно проиллюстрировать на примере обработки блок-вала колес КПП (рис. 1).

Первоначально осуществляется анализ детали на функциональное предназначение частей элементов детали на примере блок-вала колес КПП. Части и элементы детали распределены по группам соответственно своему функциональному предназначению. Для каждой части детали проводится анализ элементов, на нашем примере более подробно рассматривается группа элементов зубчатого венца, в частности группы зубьев. Анализ функций зубьев показывает, что не все зубья

работают постоянно в одинаковых условиях в процессе эксплуатации. Основная группа зубьев работает в режиме передачи крутящего момента в плоскости зацепления с ведущей шестерней.

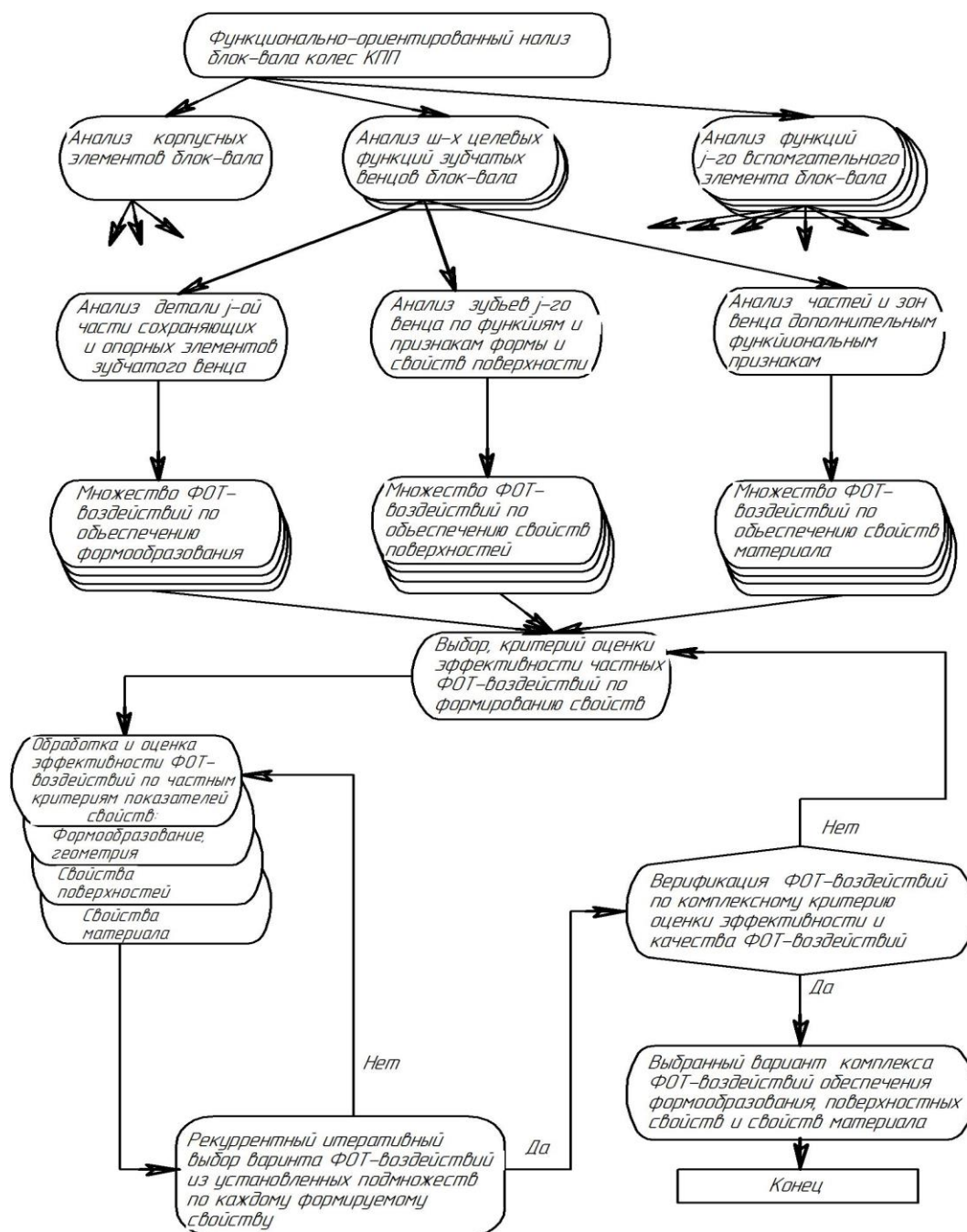


Рисунок 1. Алгоритм разработки процесса обработки зубчатых венцов блок-вала колес КПП.

Но имеется выделенная группа зубьев в ограниченном угловом секторе каждого зубчатого венца, которая в процессе переключения передач воспринимает осевые усилия и осуществляется смена зацепления шестерни с одного венца на другой в

составе блок-вала колес. В этот момент изменяется характер динамического нагружения зубчатого венца, что требует иных параметров геометрии и поверхностных свойств зубьев.

Для обеспечения достижения указанных размерных пределов этих параметров надо применить иные технологические приемы достижения результатов, отличные от тех, которые применимы для обработки основной группы зубьев.

Для использования формализованного подхода для каждого вида технологического воздействия при обработке каждого специфического элемента детали конкретизируется обобщенная формула ФОРТ-воздействия, приведенная ниже

$$T_{j(j=1\div j)} \Phi_{xyz}^a = f_k \left\{ K_{xyz}^{Sg(1\div g)} \wedge K_{i(i=1\div i)(xyz)}^{M^{var}} \right\} \quad (1)$$

В левой части выражения (1) символы T и Φ означают технологическое воздействие при формообразовании для каждой точки «а» в системе координат элемента детали по каждой линейной траектории от первой до заключительной линии прохода режущей точки в системе координат обрабатываемой поверхности детали. Символы XYZ – указывают топологическую локализацию каждого элемента в составе детали относительно общей системы координат детали.

При этом на различных участках число этих линий перемещения формообразующего элемента относительно обрабатываемой поверхности различное число. Технологическая схема предварительного нарезания зубьев среднего венца блок вала колес под напыление приведена на рис. 2.

Нарезание зубьев на двухвенцовых блок-валах трудностей не вызывает при выполнении на зубодолбежных станках с переустановкой. На трехвенцовых блок-валах зубонарезание среднего венца представляет определенные сложности. Для обработки необходимо создавать специальную оснастку для обработки пальцевым инструментом (например – в виде пальцевой или конической фрезы) по методу обкатки, а после фрезерования – шевингование боковых поверхностей зубьев.

Условные обозначения всех элементов зацепления приведены на рисунках. В технологической схеме нарезания зубчатого венца обеспечивается пять относительных движений, из которых – три прямолинейных движения, и два вращательных движений.

Вращательные движения – это главное движение резания, обороты формообразующей фрезы, а второе вращательное движение – круговое периодическое движение подачи на шаг резания при осуществлении каждого прохода фрезы вдоль линии резания на боковой поверхности. При этом одно прямолинейное движение со скоростью подачи $V_{понер}^{nod}$ обеспечивает перемещение фрезы вдоль зуба по ширине с обеспечением перебега после каждого прохода и предварительное врезание при каждом новом проходе.

Прямолинейным движением $V_{прод}^{nod}$ обеспечивается периодическая продольная подача на один шаг линии резания по высоте зуба, от головки до ножки зуба. Еще одно прямолинейное движение $V_{верт}^{nod}$ выполняется для корректировки относительного положения режущей кромки и боковой поверхности зуба в процессе резания методом обкатки, в особенности при формировании бочкообразности профиля зуба.

Величины скоростей и шаг подачи по каждому из направлений выбирается исходя из марки обрабатываемого материала зубчатого венца, а также в зависимости от глубины резания, т. е. от толщины слоя снимаемого припуска $\delta_{пр}$ боковой поверхности зуба. Из понимания процесса видно, что после обработки на поверхности должны оставаться выступы в виде острых вершин, выступающих в зоне осуществления каждого прохода режущим инструментом.

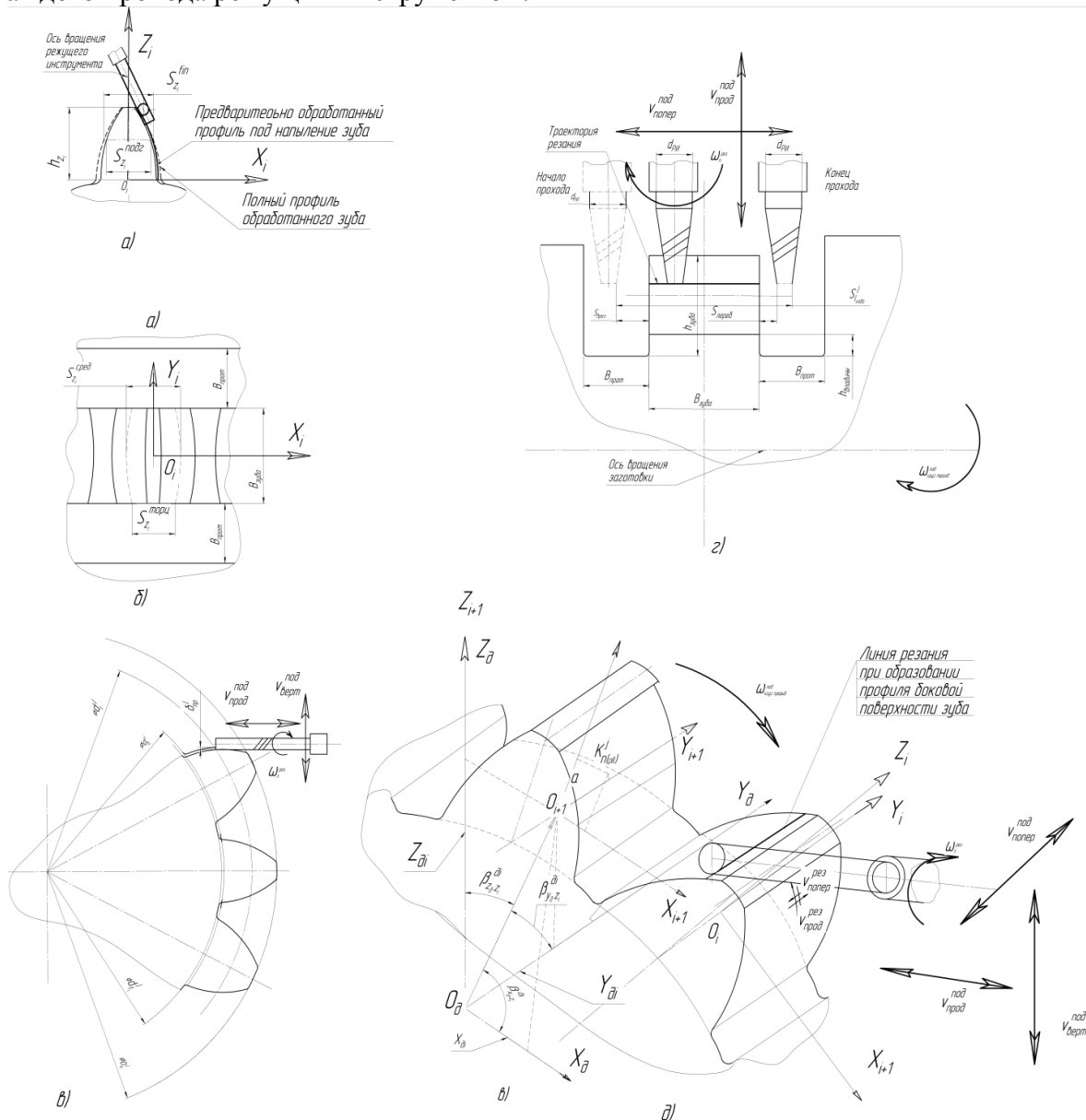


Рисунок 2. Технологическая схема формообразования профиля зубьев среднего зубчатого венца блок-вала колес: а) форма профиля зуба; б) окончательно сформированный зуб в плане; в) образующая линия режущего инструмента (РИ) срезает припуск; г) поперечный ход РИ при формировании каждой линии на проходе резания; д) аксонометрия заготовки в процессе формообразования профиля зубчатого венца и боковой поверхности зубьев.

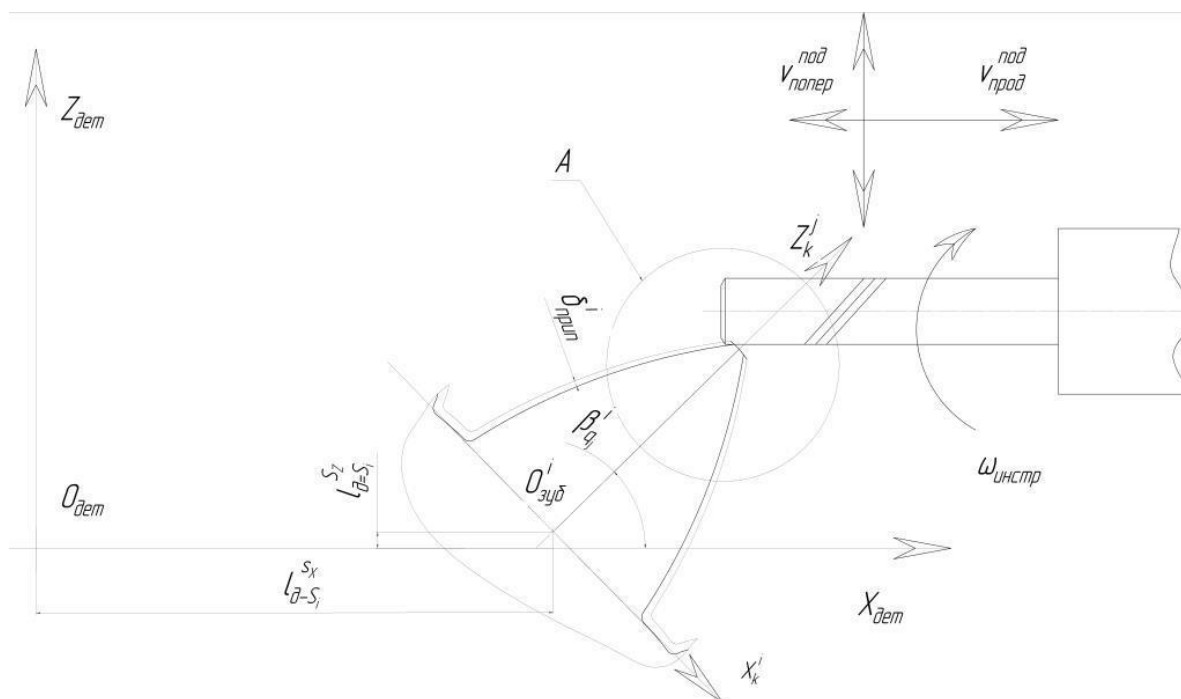
Поверхность зубьев представляет собой некую гребенчатую поверхность с параллельными гребнями на каждом шаге рабочей подачи инструмента. Высота этих выступов зависит от шага подачи инструмента в направлении формирования профиля, т.е. в плоскости, перпендикулярной оси блок-вала колес. От соотношения шага подачи и зоны эвольвенты профиля, и не зависит от величины снимаемого слоя припуска.

Зависимость от соотношения шага подачи и зоны профиля зуба определяется тем, что эвольвента на разных участках образуется с переменным радиусом кривизны. При этом на участках с более пологой кривой выступы будут иметь меньшие выступы, чем на участках с малым радиусом кривизны при осуществлении процесса резания с одни и тем же шагом подачи.

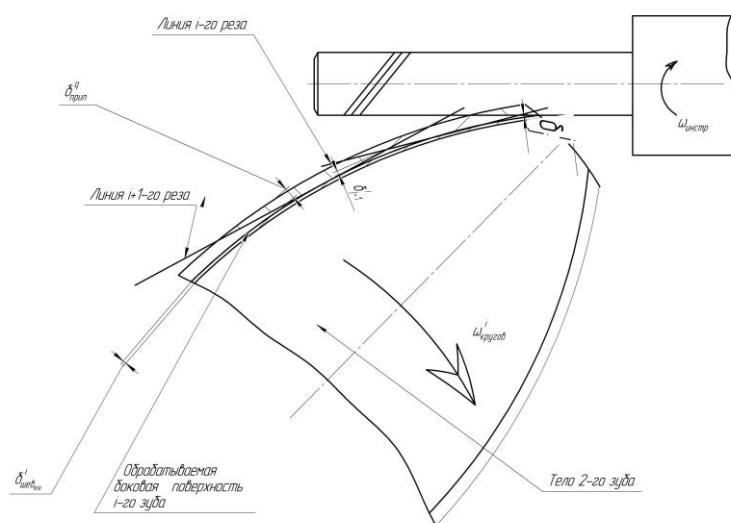
Поэтому высота выступов гребней под последующую обработку объективно в зоне ножки зуба имеют большую величину, чем в зоне головки зуба.

Дальнейшая параметризация показателей процесса обработки при формообразовании бочкообразных зубьев среднего венца блок-вала колес осуществляется расчетным путем. Схема для расчета направлений и величин скоростей резания и подач, включая прямолинейные и круговые, представлена на последующих рисунках: рис. 3, а и 3, б. При этом на рис. 3, б приведено расширение участка, представляющего схему последовательного удаления слоя припуска (рис. 3а) при каждом проходе фрезы по ширине зуба, где величина перебега и зоны врезания учитываются по схеме, показанной на рис. 2, г. На схемах указаны системы декартовых координат детали $X_d Y_d Z_d$ с центром $O_{дет}$, и каждого i -го зуба с центром $O_{iзуб}$ системы. Преобразование координат производится по известной схеме, изложенной ранее, и по источникам [4, 10, 11]. Центр системы координат каждого зуба в системе

координат детали определяется по осям X_d и Y_d в размерах: $l_{X_{d-S_i}}^{S_i}$ и $l_{Y_{d-S_i}}^{S_i}$ соответственно.



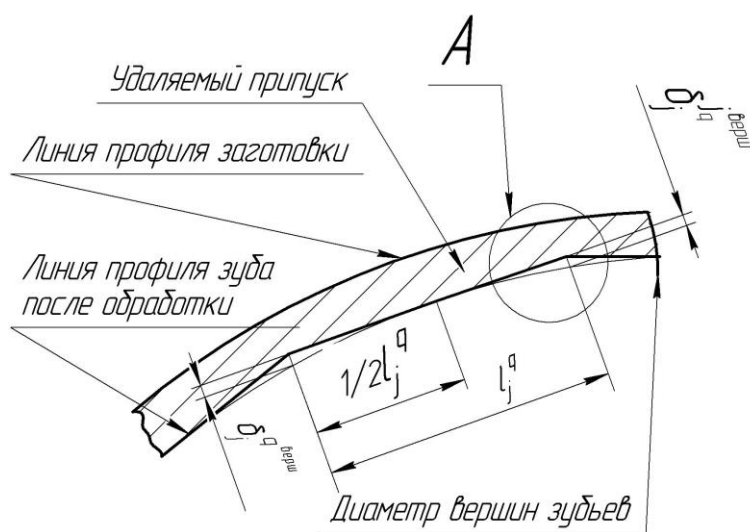
а)



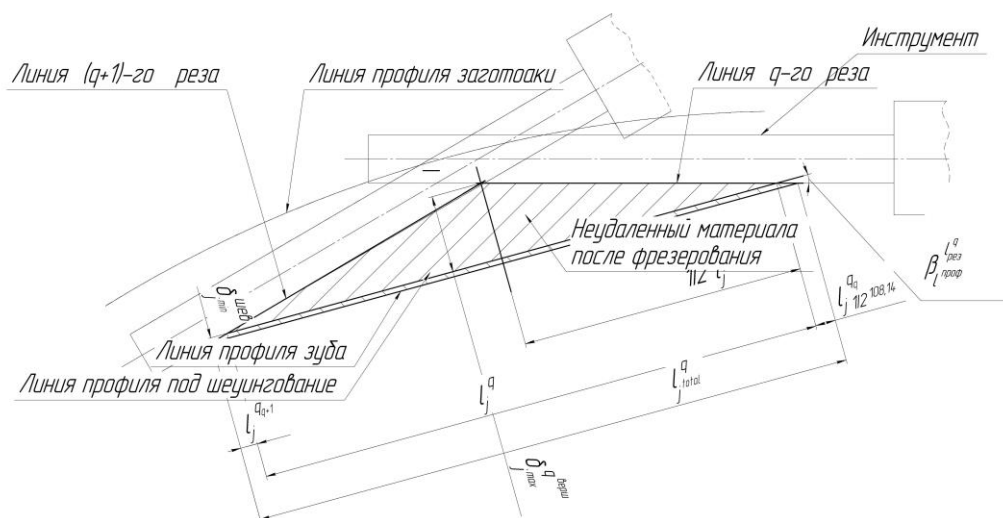
б)

Рисунок 3. Общая схема предварительного резерования боковой поверхности бочкообразных зубьев среднего венца блок-вала колес под последующую операцию шевингования: а) схема начала врезания инструмента – фрезы – у вершины зуба, при срезании первого слоя припуска, обеспечивающее формирование профиля под шевингование; б) схема, на которой дан последовательный порядок послойного срезания клиновидных припусков материала при каждом проходе фрезы вдоль профиля формируемой боковой поверхности зубьев.

На рис. 3, а, б указаны скорость вращения инструмента $\omega_{рез}$ и скорость круговой подачи $\omega_{кругов}^i$ обрабатываемого блок-вала колес, а также прямолинейные виды подачи инструмента продольной подачи $V_{прод}^{под}$ и $V_{верт}^{под}$.



а)



б)

Рисунок 4. Схемы последовательного формирования предварительной поверхности бочкообразных зубьев для финишной обработки шевингованием: удаляемые слои припуска при фрезеровании предварительного профиля зубьев; б) схема для расчета величины продольной подачи, обеспечивающей минимизацию вершин многогранного профиля под шевингование боковых поверхностей зубьев

Указаны порядок формирования линий реза, образующие многогранную поверхность вдоль эвольвентной образующей формы боковой поверхности зуба, полученную в результате пошаговой продольной подачи. При этом бочкообразность может формироваться плавной линией при обработке по программе на металлорежущем оборудовании с ЧПУ.

Фрезерование осуществляется с гарантированным минимальным припуском $\delta_{j^{\text{шев}}}^{\text{мин}}$ под шевингование, ограниченным условиями процесса в диапазоне 0,02-0,05 мм. За счет длины линии реза на каждом проходе фрезы формируется граненая поверхность, где вершины граней создают максимальные величины припусков под шевингование. Для обеспечения оптимальной величины припуска необходимо рассчитать шаг продольной и круговой подачи, которые позволяют достигать достаточное качество обработки поверхностей. Для проведения расчета приведена упрощенная схема на рис. 5.

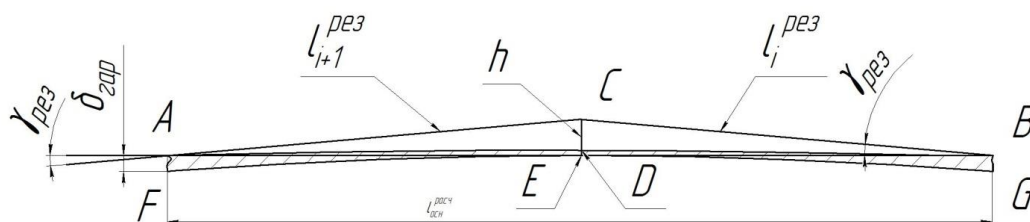


Рисунок 5. Схема расчета подач фрезерования и величины припуска под шевингование.

Расчетный треугольник BCD, образованный линией реза l_i^{pez} , линией BE, заменяющей для упрощения расчетной схемы линию BD. Ввиду малой разности изменения длины спрямленной линии за счет кривизны эвольвенты на рассматриваемом участке, можно применить способ замены эвольвенты на прямую линию, образующую угол γ_{pez} с линией l_i^{pez} . Поскольку определяющим фактором качества поверхности является высота гребня h – катет CE прямоугольного треугольника BCE, то величина продольной подачи $V_{подпрод}$ является аргументом функции $h = f(l_i^{pez})$. В этом случае для определения продольной подачи решать необходимо обратную задачу – нахождение аргумента по значению функции.

Длина дуги эвольвенты окружности в общем случае определяется в виде

$$L_{дуг.эвольв} = \frac{1}{2} R(t_2^2 - t_1^2), 0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \infty, \tag{2}$$

где t_1 и t_2 – параметр первой точки и параметр второй точки дуги эвольвенты.

При этом для произвольной точки t можно применить: $x = R(\cos t + t \sin t), y = R(\sin t - t \cos t)$ - параметрические уравнения абсциссы x эвольвенты окружности радиуса R и ординаты y эвольвенты окружности радиуса R [12].

- t – параметрическая переменная;

- x_i, y_i – абсцисса и ордината – абсцисса и ордината i -ой точки дуги эвольвенты.

Тогда $dl = \sqrt{(t^2(\cos^2 t + \sin^2 t)(dt)^2)} = t dt$. Длина дуги равна интегралу $2\pi \int t dt = (2\pi)^2/2 = 2\pi^2$.

На рис. 6 представлена схема образования эвольвенты профиля зуба, на которой определенно указана разница в радиусах, образующих эвольвенту зуба. По определению эвольвенты можно записать выражение соотношения величин: $r_{Y_i} > r_{Y_b} > r_{Y_a}$.

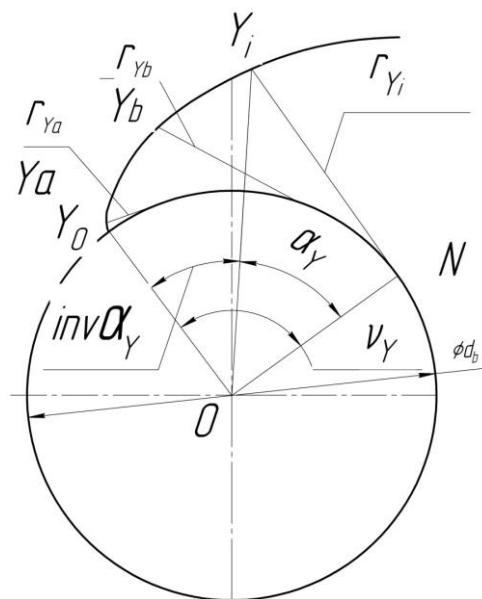


Рисунок 6. Схема образования эвольвенты зубьев венцов блок-вала колес КПП.

Здесь символы r_{Y_i} , r_{Y_b} , r_{Y_a} – величины участков касательных линий к основной окружности, которые являются одновременно мгновенными радиусами образования кривой соответственно в точках Y_i , Y_b , Y_a кривой, превращающейся в эвольвенту.

Вследствие этого высота h гребней будет переходить от минимального размера в зоне головки зуба к своему максимальному размеру в зоне ножки зуба. Такое переменное значение снимаемого припуска и его тенденция изменения в одном направлении должно быть учтено при обработке на чистовой операции шевингованием. Одновременно необходимо при планировании режимов резания (величин подач по всем осевым направлениям и скоростей вращения в процессе резания самого шевера и обрабатываемой детали).

Заключение

Проведенные в данной работе аналитические исследования применительно к разработке ФОТ-процесса обработке модифицированных бочкообразных зубьев зубчатых венцов блок-вала колес КПП без разрыва потока передаваемой мощности, безотносительно к типу производства (опытный образец или серийное производство, что безусловно налагает свои дополнительные связи на проектные работы), показали адекватность и актуальность системы создания функционально-ориентированных технологий в сфере машиностроения для разных деталей и узлов. Исследования позволили достичь поставленной в работе цели путем решения ряда частных задач:

1. Получило развитие и применение разработанного ранее формализованного отображения функционально-ориентированных взаимосвязей конструктивных признаков элементов детали и технологических эффектов ФОТ-воздействий для разработки алгоритма создания комплексной технологии, позволяющей обрабатывать модифицированные бочкообразные зубья на топологически ограниченном участке зубчатого венца блока-вала колес.

2. Разработана методика и система расчета величин припусков для обработки фрезеруемой боковой поверхности бочкообразных зубьев, оставляемых для осуществления финишной операции шевингованием.

3. Отмечены и указаны некоторые нюансы образования припусков переменной величины при обработке боковых поверхностей бочкообразных зубьев в закрытых зонах при постоянных режимах фрезерования на предварительных операциях.

4. Получено подтверждение, что сформированная таким образом боковая поверхность модифицированных зубьев становится основанием для осуществления следующей аддитивной технологической операции методом напыления с использованием карбидов твердых металлов, завершающей окончательной формирование геометрии поверхности и поверхностных свойств зубьев на ограниченном участке и в заданных координатных зонах детали.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бурцев, В. М. Технология машиностроения, в 2 т. Т.1. Основы технологии машиностроения / Бурцев В. М., Васильев А. С., Дальский А. М. и др.; под ред. Дальского А.М. – Москва: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.

2. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.

3. Разработка технологического процесса изготовления деталей летательных аппаратов / Флек М. Б., Шевцов С. Н., Родригес С. Б., Сибирский В. В., Аксенов В. Н. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2005. – 163с.

4. Котляров, Б. С. Основы структурного синтеза модификаций зубьев цилиндрических колес и схем многоинструментальных роторных машин для их формообразования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Б. С. Котляров – Харьков, 1989.
5. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / Михайлов А. Н. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346с.
6. Михайлов, А. Н. Проявление атрибутов деталей машин как факторов разработки функционально-ориентированных технологий / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 3 (70). – С. 22-33. – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.
7. Михайлов, А. Н. Синтез модели функционально-ориентированной технологической системы создания КПП без разрыва потока передаваемой мощности / Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 4 (71). – С. 35-43. – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.
8. Михайлов, А. Н. Предпосылки создания новой схемы механической зубчатой КПП с переключением без разрыва потока передаваемой мощности / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 2 (69) 2020. – С. 50-62. – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.
9. Тайц, Б. П. Производство зубчатых колес / Тайц Б. П. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
10. Обработка зубчатых колес: учебное пособие / сост. Пегашкин В. Ф.; М-во образования и науки РФ: ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (филиал). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2016. – 132 с
11. Перепелица, Б. А. Разработка теории формообразования и проектирования режущих инструментов на основе многопараметрических отображений: дис. ... д-т техн. наук / Б.А. Перепелица; ХПИ – Харьков, 1981.
12. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / Выгодский М. Я. – М.: Наука, 1964. – 783с.

Поступила в редколлегию 06.02.2023 г.