

УДК 621.01

А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф., **В. Б. Котляров**, аспирант, **С. Б. Котляров**, аспирант, **Б. С. Котляров**, канд. техн. наук.

Донецкий национальный технический университет, ДНР, Россия

Тел: +7(988)-55-40-021; +7(985) 021-79-06, +7(964) 70-45-362;

E-mail: tm@fimm.donntu.org; boris.kotlyarov@mail.ru; velidarkotlarov@mail.ru

ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТЕЙ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЗУБЬЕВ КПП БЕЗ РАЗРЫВА ППМ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НАПЫЛЕНИЕМ

В настоящей работе описаны результаты исследований, касающихся способов формирования поверхностных свойств поверхностей модифицированных зубьев, которые относятся к специфическим зонам переключения передач блок-вала колес. Рассматривается способ технологического обеспечения обработки зубьев на предварительной стадии подготовки рельефной поверхности подложки, предшествующее нанесению твердого покрытия методом вакуумного ионно-плазменного напыления твердых металлов.

Ключевые слова: деталь, часть, участок, зона, обрабатываемая поверхность зубьев, формообразование, фрезерование, покрытие, напыление.

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

PREPARATION OF SURFACES OF MODIFIED GEARBOX TEETH WITHOUT RUPTURE OF PPMS FOR APPLICATION OF WEAR-RESISTANT COATINGS BY SPRAYING

This paper describes the results of studies on methods for forming the surface properties of the surfaces of modified teeth, which relate to specific shift zones of the wheel block. A method of technological support for the processing of teeth at the preliminary stage of preparation of the relief surface of the substrate, prior to the deposition of a hard coating by the method of vacuum ion-plasma spraying of hard metals, is considered.

Keywords: detail, part, section, zone, treated tooth surface, shaping, milling, coating, spraying.

1. Введение

Качество изготовления машиностроительных изделий определяется качеством технологического обеспечения требований к входящим в сборку деталям. Качество самих деталей при этом определяется возможностью достижения требуемых в КД (конструкторской документации) показателей к точности геометрии, и в большой степени требований к свойствам поверхности в заданных пределах локализации [1, 2, 3].

Для детали типа блок-вал колес КПП (коробки переключения передач) без разрыва ППМ (потока передаваемой мощности) определяющим показателем качества, помимо общей геометрии и точности относительного положения частей и элементов, является реализация в допустимых полях отклонений формы зубьев в модифицированном исполнении по формообразованию и по поверхностным свойствам с указанием точной локализации модифицированных участков поверхностей зубьев [4, 5].

В настоящей работе приводятся результаты исследований формообразования модифицированных зубьев на участках зубчатых венцов в угловых секторах, включающих те зубья, которые в одновременном зацеплении с ведущей шестерней, переключает ступень передачи. Для обеспечения требуемых характеристик зубьев и элементов блок-вала разработан порядок и приспособления, позволяющие подготовить поверхность зубьев для финишной обработки и отделки.

2. Цель и задачи

Целью исследований настоящей работы является разработка порядка действий, описание результатов разработки и применения дополнительных приспособлений и инструментов, обеспечивающих форму модификации и параметры модифицированной боковой поверхности зубьев блок-вала колес, позволяющих нанести твердое покрытие

методом многослойного вакуумного ионно-плазменного напыления нитрида титана. Достижение поставленной цели обеспечивается решением ряда следующих задач:

1. Выбор способа подготовки боковой поверхности и обеспечения рельефа зубьев методом механической обработки после черновой операции формообразования для последующего нанесения твердого покрытия многослойным напылением.

2. Разработка порядка осуществления процесса ФОТ-воздействия (функционально-ориентированного технологического воздействия) на участках с затрудненным доступом серийным инструментом на металлорежущих станках. Алгоритм операций подготовки поверхности под специальное покрытие.

3. Разработка кинематики относительных движений заготовки и исполнительных органов, обеспечивающих геометрию подготавливаемой поверхности.

4. Параметрический расчет исполнительных инструментов и режимов обработки, обеспечивающей требуемые характеристики поверхности.

3. Основное содержание

Вопросы формообразования для получения требуемой геометрии деталей ранее рассмотрены в работах автора. В настоящей работе уделено внимание подготовительной операции для обеспечения требуемого рельефа боковых поверхностей бочкообразных зубьев для нанесения многослойного неравномерного покрытия нитридом титана методом вакуумного ионно-плазменного напыления. Принципиально выбор способа подготовки боковых поверхностей зубьев для напыления блок-вала колес осуществляется согласно алгоритму, который является частью обобщенного алгоритма обработки блок-вала, приведенному на рис. 1.

После механической обработки на предварительных операциях и после чернового нарезания зубьев в дальнейшем осуществляется модифицирование зубьев венцом путем придания бочкообразности. Один способ образования бочкообразных зубьев блок-вала колес подробно рассмотрен ранее. Способы обработки шеек вала, посадочных, вспомогательных, иных поверхностей в настоящей работе опускаются. Обработка венцов рассматривается как операции по разным потокам процесса. Более подробно приводится алгоритм для операций, которые выполняются для потока среднего венца, рис. 1.

Множество возможных ФОТ-воздействий, с помощью которых можно достигать результатов в необходимых параметрах, включает различные способы формообразования и формирования свойств поверхностей. Методом рекуррентно-итеративного выбора для реализации принят способ электроэрозионной обработки. Этот выбор обусловлен такими факторами, которые определяют размерные параметры геометрически ограниченных контуров боковых поверхностей зубьев при одновременной возможности управлять в дальнейшем толщинами в любом из напыляемых слоев от первого до крайнего. Исходя из того, что все слои напыления по толщине имеют размеры, определяемые микронами, (что связано с высокой износостойкостью напыляемого материала), имеется легко осуществляемая

технологическая возможность управлять глубиной разделки для каждого слоя путем изменения режимов процесса. Величина заглабления площадки под каждый слой напыления может варьировать в пределах от 15 мкм до 300 мкм.

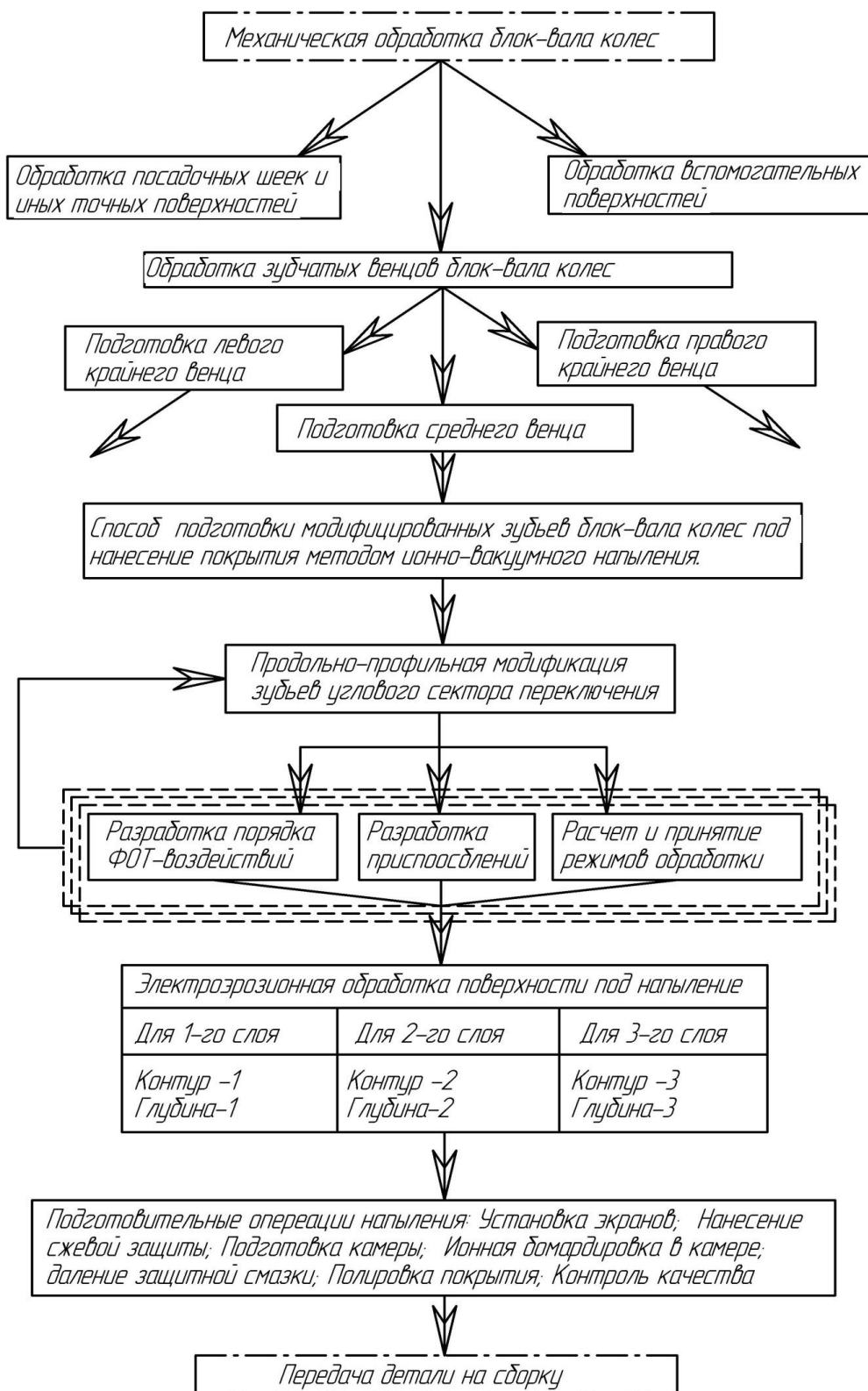


Рисунок 1. Алгоритм подготовки поверхности зуба под напыление.

Разрабатывается частный маршрутный техпроцесс для осуществления подготовительных операций в заданной координатной локализации под напыление с учетом предварительной разработки необходимого оснащения, инструментов и приспособлений. Задаются параметры режимов обработки на каждом технологическом переходе и проходе:

- для 1-го контура по первому слою;
- для 2-го контура по второму слою;
- для 3-го контура по третьему слою.

Следующий этап посвящается разработке технологической операции, собственно, по подготовке геометрически ограниченных участков боковых поверхностей зубьев венцов в однозначно определенных локализациях в системе координат блок-вала колес под процесс напыления. Подготавливается материал для защитных экранов по каждому слою напыления, а также материалы для нанесения сажевого покрытия для участков поверхностей, не подлежащих напылению твердыми материалами по каждому слою.

Порядок формирования рельефного основания на поверхностях бочкообразных зубьев блок-вала колес. Снятие излишков материала осуществляется в определенном порядке и последовательности, при которой послойное напыление наилучшим образом соответствует запланированной форме модификации поверхностей зубьев.

Последовательность порядка формирования профиля и иллюстрация контуров рельефных образований для послойного напыления с учетом локализации в их относительном расположении, приведена на рис. 2.

На рис. 2а приведен контур выборки материала для 1-го слоя напыления с указанием глубины выборки h_1 , при этом приведен весь порядок координатных систем от детали – блок-вала, до координатной системы для каждого зуба блок-вала колес. На последующих рисунках - 2б и 2в, указаны профили заглублений для 2-го и 3-го слоев с глубинами h_2 и h_3 соответственно. На этих рисунках указаны системы координат только самих зубьев, в которых можно фиксировать локализацию рельефных образований.

Явления, происходящие в межэлектродном промежутке, весьма сложны и являются предметом специальных исследований. Здесь же отметим, что будет рассмотрена простейшая схема удаления металла из области обработки посредством электрической эрозии. Производительность процесса зависит от величины энергии импульса и длительности воздействия импульса на электродах. Энергия импульса $E_{\text{и}}$ может изменяться от 0,001 Дж до 2,0 Дж, а длительность импульса $T_{\text{и}}$ при разряде от 9 мкс до 1500 мкс. При этом размеры лунки удаляемого материала могут варьироваться в пределах величин по глубине h_k от 0,015 мм до 0,050 мм; по диаметру лунки dk от 0,1 мм до 2,0 мм; по объему удаляемого материала V_k от 0,000078 мм³ до 0,10 мм³.

Вариативность эффективности удаления материала заготовки при воздействии напряжением различной мощности и с различной длительностью воздействующего импульс позволяет регулировать процесс по производительности. При этом качество поверхности можно регулировать с тем, чтобы на нижних слоях можно оставлять более грубое качество поверхности, а для последних слоев можно снижать величину отклонений от номинального уровня, что соответствует снижению шероховатости поверхности.

Так для выполнения профиля 3-го слоя величина заглубления от поверхности с учетом двух верхних слоев может достигать абсолютной величины до 600-650 мкм.

Для формирования профиля по 2-му слою учитываем толщину 1-го слоя, и общая глубина профилирования может составлять 350 – 400 мкм. При этом профили 2-го и 3-го слоев выполняются при повышенной энергии импульса. Профилирование поверхностей под напыление 1-го слоя выполняется меньшей энергией и меньшей длительностью импульса при максимальной глубине прорабатываемого слоя до 150 мкм с минимальным объемом удаляемого материала за период воздействия единичного импульса. За счет такого регулирования интенсивности процесса обеспечивается максимальная эффективность ФОТ-воздействия.

Для профилирования боковой поверхности зуба под напыление надо применять свой профиль инструмента-катода для обработки каждого слоя. На рис. 3 приведены эскизы сечений для каждого слоя профиля и форма инструментов-катодов для обработки каждого слоя боковой поверхности. На рис. 3б, 3в, 3г показаны сечения для 1-го, 2-го и 3-го слоя профиля под напыление. На рис. 3д, 3е, 3ж приведены эскизы формы инструментов для электроэрозионной обработки для 1-го, 2-го и 3-го слоя под напыление боковой поверхности зуба.

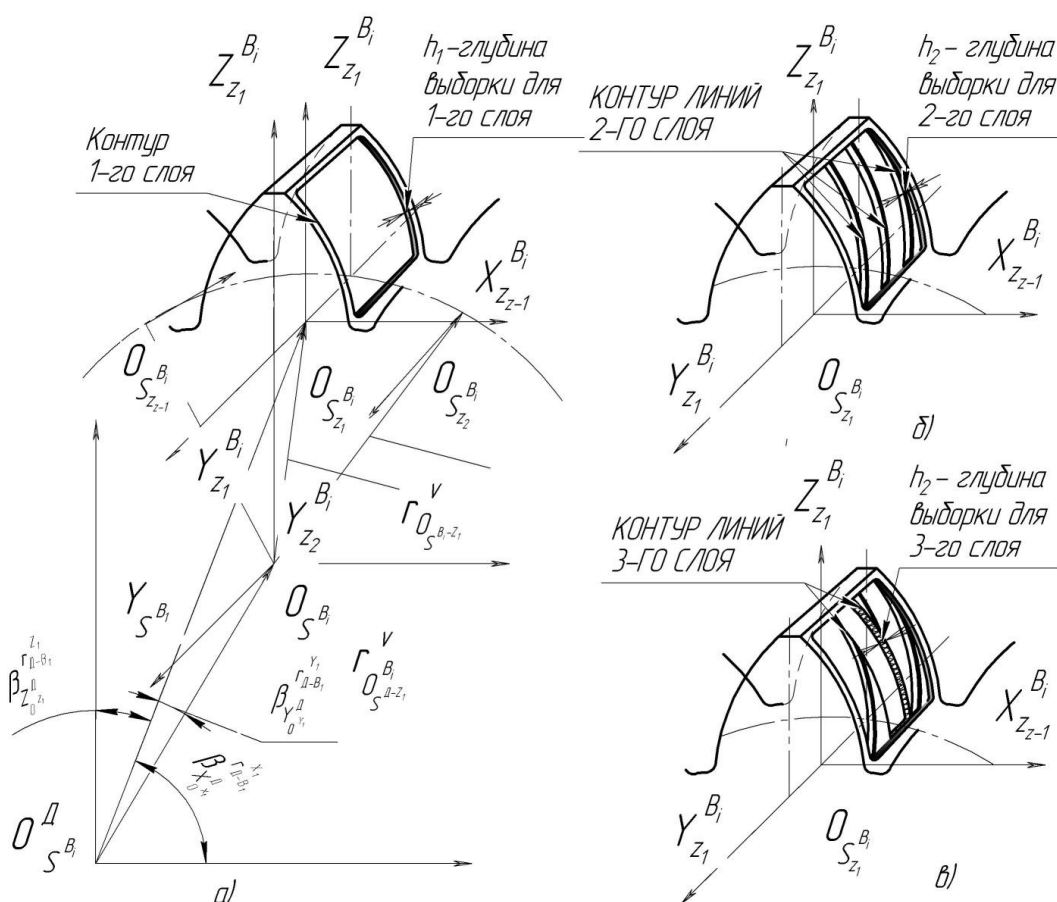


Рисунок 2. Подготовка профилей боковой поверхности зуба под напыление.

а) заглабление под профиль 1-го слоя напыления; б) заглабление под профиль 2-го слоя напыления; в) заглабление под профиль 3-го слоя напыления.

Указаны величины заглаблений h_1 , h_2 , h_3 по отдельности для каждого слоя обработанной поверхности. Для 2-го и 3-го слоя указана ширина сектора обработки S_1 и S_2 . Для электроэрозионной обработки (ЭЭО) 1-го слоя форма поверхности инструмента соответствует форме поверхности зуба по прилегающей бочкообразной поверхности.

На рис. 3а, 3з показан собственно профиль подготовленного для обработки бочкообразного зуба и сечение профилированного зуба под последующее напыление.

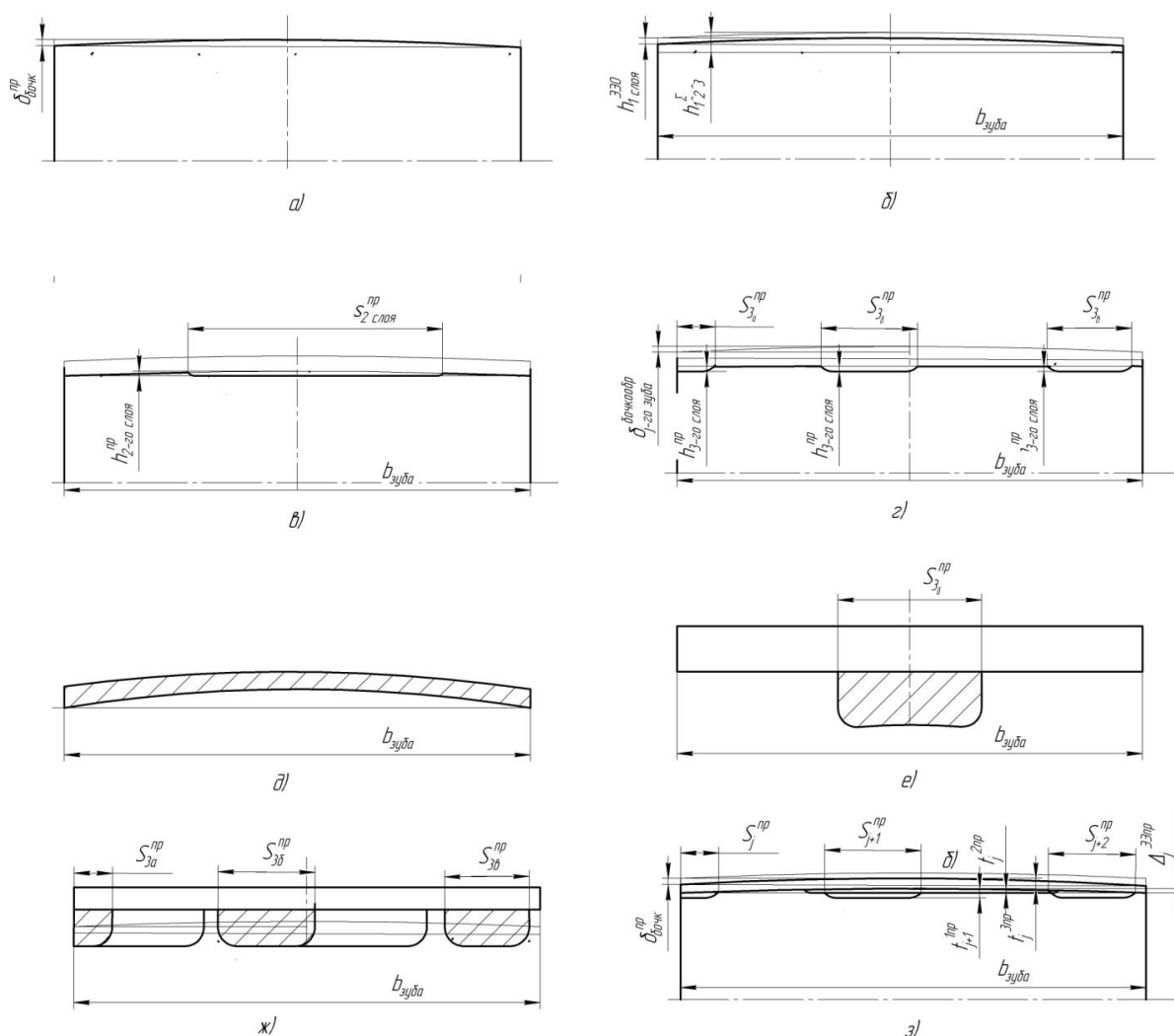


Рисунок 3. Профилирование боковой поверхности зубьев блок-вала колес:
 а) профиль боковой поверхности бочкообразного зуба; б) профиль сечения выборки для 1-го слоя; в) профиль сечения выборки для 2-го слоя; г) профиль сечения выборки для 3-го слоя; д) профиль сечения электрода для 1-го слоя; е) профиль сечения электрода для 1-го слоя; ж) профиль сечения электрода для 2-го слоя; з) профиль сечения электрода для 3-го слоя.

Формальная запись каждой поверхности, подвергаемой обработке под напыление, отражает все признаки части детали в следующем виде:

$$Пj = F(X_{i(i=1,2,...,n)}^{Пj(j=A,B,...,Я)}, Y_{i(i=1,2,...,n)}^{Пj(j=A,B,...,Я)}, Z_{i(i=1,2,...,n)}^{Пj(j=A,B,...,Я)}), \quad (1)$$

где $X_i^{П}, Y_i^{П}, Z_i^{П}$ являются функциями от X, Y, Z в частных системах координат частей от «А» до «Я» детали блок-вал [9]. При этом в правой части выражения (1)

выражена локализация поверхности по координатам общей координатной системы детали.

Функции технологической системы, отражающие функциональное наполнение ФОТ-воздействия по каждому отдельному слою формирования профиля под напыление может быть представлено следующим выражением,

$$T_{\sum_{i=1}^{i=i}}^{\Phi_{dem}} = f(T_{j^z(x,y,z)}^{\phi_k^{v_i^p(x,y,z)\omega_{x,y,z}^p}} \cap T_{n^z(x,y,z)}^{\phi_k^{v_i^p(x,y,z)\omega_{x,y,z}^p}}), \quad (2)$$

где T^{Φ} является функцией координат X, Y, Z в системе координат обрабатывающего технологического комплекса. При этом в процессе формообразования каждая образующая точка однозначно соответствует тем точкам поверхностей обрабатываемой детали, которые отражены в выражении (2), и тогда формируемая поверхность Φ^{Π} может быть представлена в виде функционала функции поверхности Π_j детали (2) и функции движения формирующей точки T^{Φ} инструмента.

Взаимовлияние функциональных признаков обрабатываемой поверхности детали и ФОТ-воздействия можно отразить в следующем виде

$$\Pi_{P_i^k}^{n_j} \xleftrightarrow[T]{\Pi} T_{\sum_{i=1}^{i=i}}^{\Phi_{dem}} \cap T_{\sum_{i=1}^{i=i}}^{\Pi_{dem}}, \quad (3)$$

где в левой части представлена суть требований к обрабатываемой поверхности, а в правой части выражения (3) – суть ФОТ-воздействий, относящихся к формообразованию, и к формированию свойств поверхностей на каждом уровне профилирования участков напыления.

Принимая во внимание то обстоятельство, что обработка участков под нанесение покрытий поверхностей при подготовке боковых поверхностей зубьев осуществляется методом ЭЭО, кинематика относительных движений исполнительных органов установки и заготовки выполняется максимально простым образом. Заготовка

имеет пошаговое круговое вращение с угловым шагом $t_{z_i}^{\varphi} = \frac{2\pi}{z}$, где z_i – общее число зубьев i -го венца блок-вала колес. При этом время T_i^k обработки i -го венца блок-вала колес определяется как:

$$T_i^k = z_i^{n^{k1}} (T_u^{k1} + T_{nep}^{k1}) + z_i^{n^{k2}} (T_u^{k2} + T_{nep}^{k2}) + z_i^{n^{k3}} (T_u^{k3} + T_{nep}^{k3}) \quad , \quad (4)$$

где в левой части представлено полное время обработки блок-вала колес на операции подготовки боковой поверхности зуба под напыление. В правой части выражения (4) представлено суммарное время обработки отдельными блоками времени профилирования по каждому венцу. Это время состоит из времени собственно профилирования и времени технологического перехода при обработке каждого зуба в

количестве $z_i^{n^{km}}$, где в свою очередь $m = (1, 2, 3)$ по количеству слоев профилирования и числа зубьев z^k , обрабатываемых на каждом зубчатом венце.

Общая конструктивная схема ЭЭО боковой поверхности зубьев венцов блок-вала колес представлена на рис. 4. Зубчатое колесо поз. 1 имеет шаговое периодическое вращение на угол $\phi_i^{z^k}$ вокруг оси поз. 2, определяемый числом зубьев z^k обрабатываемого венца блок-вала и зависит от порядка реализации технологии обработки.

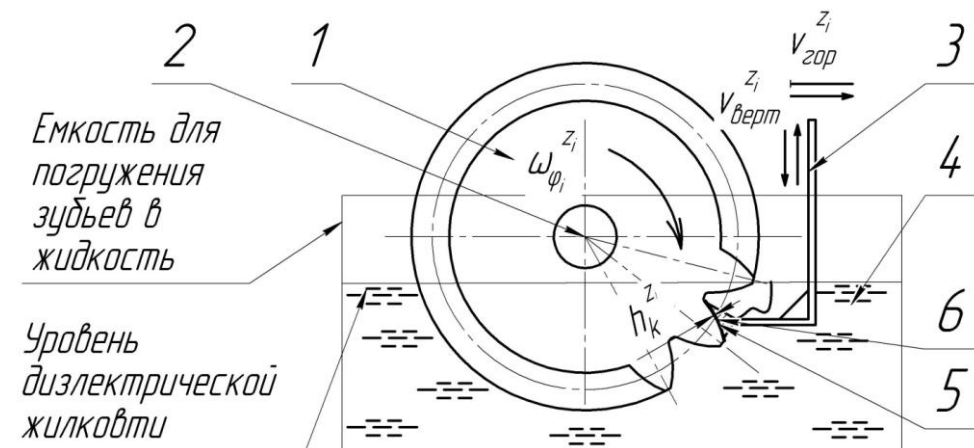


Рисунок 4. Схема ЭЭО боковой поверхности зуба под напыление.

После импульсной обработки 1-го слоя поверхности 5 для k -го зуба венца кронштейн 3 электрода 6 отводится в горизонтальном направлении от зоны обработки $V_{гор}^{z_i}$ и поднимается вверх $V_{верт}^{z_i}$ выше уровня диэлектрической жидкости 4 (масло) для освобождения пространства, которое обеспечивает пошаговый проворот зубчатого венца блок-вала колес на 1 зуб (угол $\phi_i^{z^k}$).

Последовательно обрабатывается z^k по 1-му слою, после чего осуществляется переналадка. Меняется электрод поз. 6 для профиля 2-го слоя, и осуществляется последовательно обработка всех z^k зубьев венца, после чего повторяется операция переналадка для 3-го слоя поверхности.

Последовательность выполнения всех действий по профилированию поверхностей зубьев послойно проиллюстрирована на рис. 5 укрупненно.

Выделено три блока выполнения действий, разделенные по каждому венцу и по блокам слоев для каждого венца блок-вала колес. В каждом блоке по каждому венцу действия для обеспечения послойного профилирования боковых поверхностей зубьев повторяются в аналогичной последовательности. При этом угловой шаг поворота колеса индивидуально рассчитывается для каждого венца в зависимости от количества зубьев в угловом секторе переключения каждого венца, и в зависимости от общего числа зубьев на каждом венце блок-вала колес.

Таким образом проводится ЭЭО обработки боковых поверхностей зубьев угловых секторов каждого венца блок-вала колес, профили которых позволяют переходить к операциям с использованием ФОТ-воздействий для нанесения покрытий методом напыления.

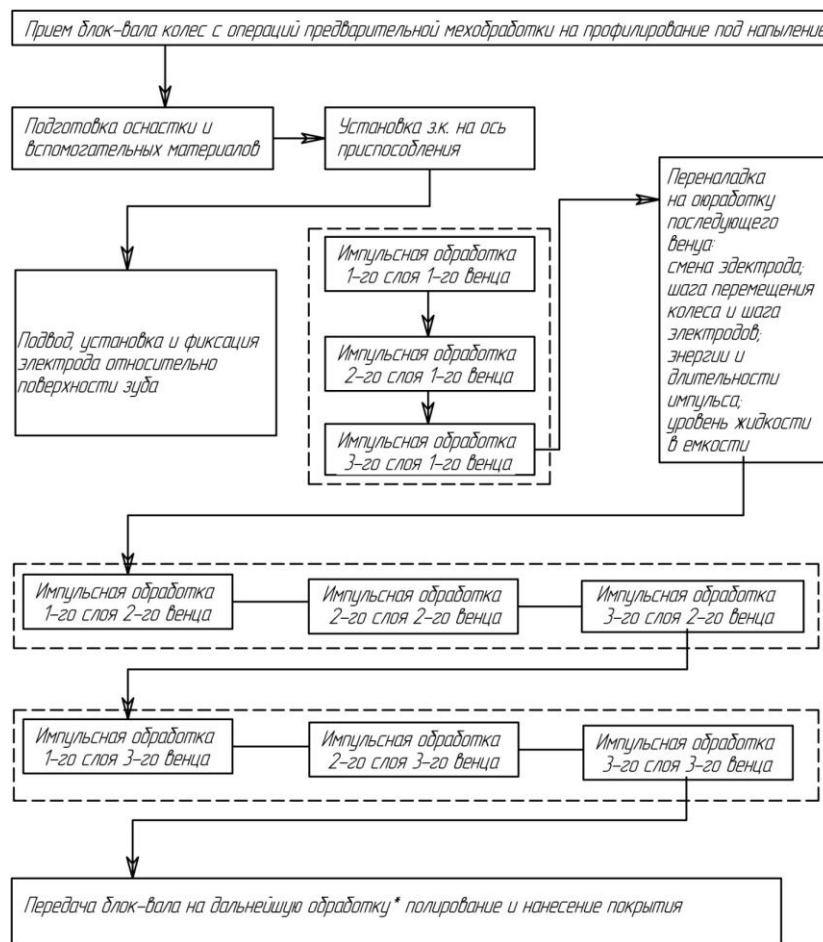


Рисунок 5. Последовательность операций послойного профилирования поверхности зубьев.

По итогам исследований в каждой части работы можно сделать вывод о практической возможности реализации подготовки боковой поверхности зубьев блок-вала колес (с учетом множества различных способов реализации) при применении ФОТ-воздействия на основе методов ЭЭО в заданных координатных локализациях обрабатываемых участков.

4. Заключение

В данной работе приведены результаты исследований относительно образования геометрической формы и поверхностных свойств боковых поверхностей зубьев венцов блок-вала колес, которые расположены в угловых секторах переключения передач. Рассмотрен процесс подготовки боковых поверхностей зубьев за счет дифференциального профилирования под нанесение последующего твердого покрытия методом напыления. Решены следующие частные задачи:

1. Осуществлен выбор способа подготовки боковой поверхности и обеспечения рельефа зубьев методом ООЭ после механической обработки на предварительной операции формообразования и шевингования, предшествующей последующему нанесению твердого покрытия многослойным напылением.

2. Разработан порядок осуществления процесса ФОТ-воздействия на участках с затрудненным доступом серийным инструментам на металлорежущих станках. Разработан алгоритм операции подготовки поверхности под специальное покрытие.

3. Разработана кинематика относительных движений заготовки и исполнительных органов, обеспечивающих геометрию подготавливаемой поверхности.

4. Проработан общий порядок расчета исполнительных инструментов и режимов обработки, обеспечивающей требуемые характеристики поверхности.

Практическое использование результатов исследований, приведенных в настоящей работе, позволяет путем итеративного рекуррентного выбора вариантов ФОТ-воздействий на обрабатываемые поверхности выбрать оптимальный способ обработки деталей с целью улучшения качества и шероховатости обрабатываемых поверхностей в машиностроительном производстве. При этом обработка деталей осуществляется как с применением механической обработки, так и обработки без снятия стружки, что расширяет технологические возможности применения технологий функционально-ориентированных направленностей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Заблонский К. И. Детали машин - К.; Вища школа, 1985. – 518с.
2. Михайлов А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. Донецк, ДонНТУ, 2009. -346с.
3. Базров Б. М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
4. 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.
5. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения.
6. Нефедьев С. П. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твердых наплавленных покрытий / С. П. Нефедьев, Р. Р. Дема, Д. А. Котенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 103-106.
7. Михайлов А. Н. Особенности обеспечения функционально-ориентированных свойств зубьев КПП при их модификации и формообразовании / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Полякова Л. П. // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-19 сентября 2021 г. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – С. 318-322. ISSN 2079-2670.
8. Михайлов А. Н. К вопросу синтеза структурных схем формирования поверхностных свойств деталей с пленочными образованиями методами ФОТ / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021.– Вып. № 1(72). – С. 27-39. ISSN 2073-3216, (E)ISSN2518-7120
9. Михайлов А. Н. Синтез структурных схем функционально-ориентированного технологического воздействия при формообразовании и формировании поверхностных свойств деталей КПП / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2021. Вып. 2 (73). С. 53-67. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

Поступила в редколлегию 20.03.2025 г.