

интенсивно, так лишь на $n = 5$ проходе и $\Sigma a = 0,5$ мм обнаруживается измельчение зерен, на $n = 7$ и $\Sigma a = 0,75$ мм наклон зерен становится более четким, и на $n = 9$ и $\Sigma a = 0,8$ мм начинается шелушение.

Следует также отметить, что при равенстве числа циклов деформаций степень изменения микроструктуры поверхностных слоев и глубины залегания этих изменений будет больше при большем натяге на деформирующий элемент, а следовательно, большем суммарном натяге.

Причиной увеличения степени структурных изменений является трение деформирующих элементов об обрабатываемую поверхность, и чем большему числу циклов деформаций и трения подвергается обрабатываемая поверхность, тем больше вытягиваются зерна поверхностного слоя в сторону действия силы трения.

Таким образом, в процессе пластической деформации, происходящей при протягивании отверстия деформирующими протяжками, поверхностные слои металла претерпевают структурные изменения, выражающиеся в образовании текстуры, а в некоторых случаях и в дроблении зерен.

Упрочненный поверхностный слой имеет повышенную твердость по сравнению с твердостью сердцевины. Наиболее существенные влияния на структурные изменения и упрочнения оказывают натяг на деформирующий элемент, толщина стенки и исходная твердость обрабатываемого материала.

Выводы

При обработке с МПС в режиме избирательного переноса изменения микроструктуры поверхностных слоев металла происходят менее интенсивно, чем при обработке с сульфореолом и выражаются в некоторых случаях лишь в дроблении зерен. Следовательно, образование текстуры в поверхностных слоях связано с деформациями сдвига (а при обработке с МПС они меньше), предопределяемыми характером трения, а дробление зерен – деформацией растяжения (утонения) стенки заготовки, обусловливаемой величиной натяга деформирующего протягивания.

Литература

1. Проскуряков Ю.Г., Романов В.И., Исаев А.Н. Объемное дорнование отверстий. М., Машиностроение, 1984, 222с.
2. Розенберг А.М. Физические явления при деформирующем протягивании и резании пластических материалов. Киев, Институт сверхтвердых материалов АН УССР, 1988, 187с.

Параметрическая оптимизация зубообрабатывающих операций

к.т.н. проф. Виноградов В.М., к.т.н. проф. Черепяхин А.А.

Университет машиностроения

8(499)1621351, trada73@mail.ru, 8(495)4670950, tkm1410@yandex.ru

Аннотация. Освещены вопросы параметрической оптимизации процессов изготовления среднемодульных зубчатых колес трансмиссий и двигателей транспортные средств и приводов станков. Разработана математическая модель зубообрабатывающей операции и алгоритм параметрической оптимизации технологического процесса обработки зубчатого венца. Намечены пути совершенствования технологических процессов обработки зубчатых колес.

Ключевые слова: обработка зубчатых колес, технологическая операция критерий, алгоритм, стабильность, точность, оптимизация

Проблема интенсификации производства ставит перед наукой задачу повсеместной оптимизации технических решений на всех уровнях производственного процесса обработки деталей. Особое значение имеет рациональное решение этой задачи на таких трудоемких операциях, как зубообработка, где ход операции определяется большим числом взаимодействующих технологических факторов.

Качественная определенность процесса зубообработки обусловлена его структурой, под которой понимается совокупность устойчивых отношений между частями технологического процесса. Различное взаимное расположение операций в технологическом процессе оказывает существенное влияние на его структуру. Изменение качественного состава и количества зубообрабатывающих операций при обработке одного и того же зубчатого колеса вызывает изменение структуры технологического процесса.

Анализ существующих методов технологических исследований показывает, что в основе решения задачи повышения эффективности зубообработки цилиндрических колес должен лежать метод математического моделирования.

В условиях машиностроительного производства любая технологическая операция обработки зубчатого колеса определяется взаимодействием конструктивных, технологических, экономических и эксплуатационных факторов: конструкции колеса, точности и производительности обработки, материальных затрат на операцию, металлоемкости и физико-механических свойств обрабатываемого колеса. Эти факторы взаимообусловлены и связаны между собой сложными зависимостями. В технологической операции вышеупомянутые факторы реализуются через исходные, переменные и выходные параметры, объединяемые соответственно в множества C , D и E . Формализованную модель зубообрабатывающей операции можно представить как систему взаимодействия исходных и переменных технологических параметров с выходными параметрами операции (рисунок 1).

К исходным данным следует отнести: конструкцию обрабатываемого зубчатого колеса, его технические характеристики (нормальный модуль, число зубьев, ширину зубчатого венца, материал колеса, его конфигурацию, типоразмер и пр.), объем выпуска зубчатых колес. Исходные параметры i -ой операции можно представить множеством C_i и записать в виде:

$$C_i = \{T_{\text{вых}(i-1)}, \Pi_{\text{к}(i+1)}, Z_{(i+1)}, \Phi R_{z(i-1)}, Z_{\text{расч.}i}, T_{a(i-1)}\};$$

где: $T_{\text{вых}(i-1)}$ - выходная точность предыдущей технологической операции; $\Pi_{\text{к}(i+1)}$ - тип производящего контура инструмента, определяемый последующей операцией; $Z_{(i-1)}$ - вид заготовки с предыдущей операции; τ - такт выпуска зубчатых колес; $R_{z(i-1)}$ - высота микронеровностей боковых поверхностей зубьев, полученных на предшествующей операции; $Z_{\text{расч.}i}$ - величина расчетного припуска на выполняемой операции; $T_{a(i-1)}$ - глубина дефектного слоя после выполнения предыдущей операции.

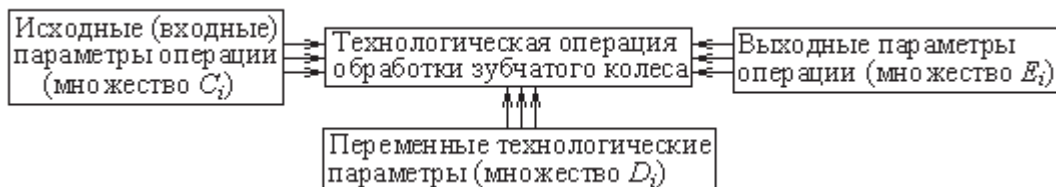


Рисунок 1. Схема взаимодействия параметров технологической операции обработки зубчатого колеса

Для определения исходных (входных) параметров каждой операции необходимо иметь совокупность правил и формул, устанавливающих зависимости между параметрами операции и исходными данными. Например, тип производящего исходного контура инструмента определяется с учетом ширины зубчатого венца, числа зубьев и конструкции зубчатого колеса.

Переменные технологические параметры i -й операции могут быть представлены множеством D_i :

$$D_i = \{C_{\text{в.}i}, M_{\text{ин.}i}, M_{\text{п.ин.}i}, P_{\text{обр.}i}, K_{\text{об.}i}, X_{\text{н.}i}, \delta_{\text{н.}i}, C_{\text{и.}i}, C_{\text{х.у.з.}i}, K_{\text{м.с.}i}\};$$

где: $C_{\text{в.}i}$ - способ воздействия на металл (резание или пластическое деформирование), принятый на i -й операции; $M_{\text{ин.}i}$, $M_{\text{п.ин.}i}$ - материал и метод профилирования инструмента соответственно; $P_{\text{обр.}i}$ - режимы обработки; $K_{\text{об.}i}$ - стоимость единицы оборудования; $X_{\text{н.}i}$ - уровень настройки станка; $\delta_{\text{н.}i}$ - допуск на настройку станка; $C_{\text{и.}i}$ - затраты на обрабатывающий инструмент; $C_{\text{х.у.з.}i}$ - жесткость технологической системы; $K_{\text{м.с.}i}$ - коэффи-

циент межнастроечной стабильности операции.

Множество D_i характеризует всю совокупность допустимых значений технологических переменных параметров, определяющих возможные варианты протекания операции зубообработки колеса. Если каждый элемент множества D_i обозначить через « d », то можно задать это множество при помощи обозначения:

$$D_i = \{d \mid d_{\min} \leq d \leq d_{\max}\} \quad d \subseteq D_i$$

Эта запись говорит о том, что каждый элемент множества D_i представляет собой подмножество d , элементы которого есть совокупность значений переменного технологического параметра операции в пределах области его регулирования.

К выходным параметрам операции, представленным множеством E_i , относятся: суммарные затраты на выполняемую операцию C_i ; выходная точность операции $T_{\text{вых},i}$; высота микронеровностей и глубина дефектного слоя на боковых поверхностях зубьев Rz_i и T_{ai} ; форма профилей (модифицированная или нет); штучная стойкость инструмента $T_{\text{шт},i}$; коэффициент точности операции K_{ti} ; величина расчетного припуска под последующую операцию $Z_{\text{расч},i}$. Множество E_i можно записать в виде:

$$E_i = \{C_i, T_{\text{вых},i}, Rz_i, T_{ai}, \Phi_{\text{проф},i}, T_{\text{шт},i}, K_{ti}, Z_{\text{расч},i}\}$$

При решении задачи повышения эффективности i -й операции зубообработки отыскиваются такие значения переменных технологических параметров, которые обеспечивают получение минимальных затрат на операцию, наивысшей точности обработки при удовлетворении требований по производительности, заданному качеству зубчатых колес по точности и форме модификации зубьев, обеспечивающей наибольшую изгибную их прочность. Эти значения технологических параметров операции образуют множество D_{oi} . Так как $D_{oi} \neq D_i$, то множество D_{oi} является «строгим» или «истинным» подмножеством D_i и, следовательно, $D_{oi} \subset D_i$. Множества D_{oi} и D_i являются конечными упорядоченными множествами, так как они состоят из конечного числа элементов, расположенных в определенной последовательности.

Внутри множеств, характеризующих исходные, переменные и выходные параметры операции, как правило, имеет место функциональная связь между некоторыми элементами. Эти элементы множеств являются «отмеченными» и связаны между собой определенными отношениями. Например, для множества C_i «отмеченными» парами являются Rz_i и T_{ai} , $T_{\text{вых},i}$ и $Z_{\text{расч},i}$. При этом элементы пар связаны между собой определенными отношениями.

Помимо отношений между отдельными элементами внутри множеств C_i , D_i и E_i имеются отношения между элементами этих множеств. При этом отношения между элементами двух множеств (например D и E или C и D) называются бинарными отношениями, устанавливающими соответствие элементов одного множества элементам другого множества. В нашем случае бинарные отношения могут быть заданы совокупностью упорядоченных пар, которые являются элементами множества $C_i \times D_i$. Бинарные отношения могут задаваться некоторыми свойствами, выражениями в словесной или символической форме.

Бинарные отношения между упорядоченными парами двух множеств можно также задавать с помощью ориентированных графов. Для рассмотренного случая пример такого графа показан на рисунке 2. Вершины графа соответствуют элементам множеств, а дуги – отношениям между ними.

Бинарные связи между отдельными технологическими параметрами операции можно установить с помощью аналитических зависимостей или на основании многофакторного эксперимента.

Все многообразие структурных схем технологических процессов изготовления зубчатого колеса можно представить в виде дерева графов (рисунок 3), множество вершин « A » которого изоморфно промежуточным состояниям зубчатого колеса в процессе обработки, а множество ребер « B » – этапам изготовления колеса.

Любой путь на дереве из A_0 в A_i (начального и конечного состояний) представляет собой один из возможных вариантов технологического маршрута обработки колеса. Вершина графа « A_0 » характеризует исходное состояние заготовки, а вершина « A_i » – конечное состоя-

ние, соответствующее техническим условиям на изготовление зубчатого колеса.

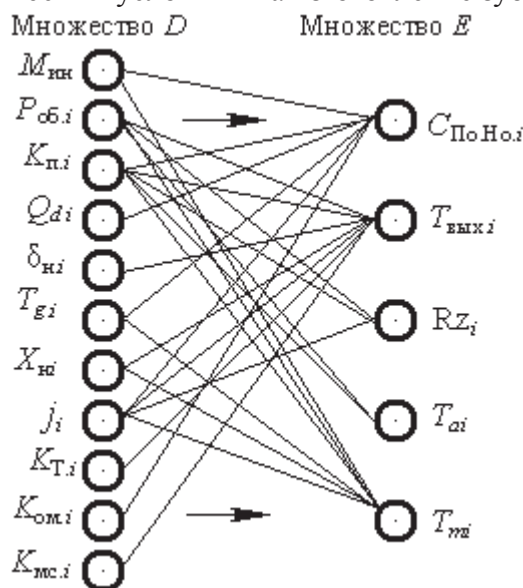


Рисунок 2. Ориентированный граф связи элементов множеств D_i и E_i

Исходное состояние заготовки задается множеством параметров, характеризующих форму и размеры заготовки, материал и его физико-механические свойства, способ получения заготовки. Промежуточные состояния A_i зубчатого колеса, полученные в результате выполнения i -й операции, характеризуются входными параметрами $(i+1)$ -й операции (множество $C_{(i+1)}$), либо частью выходных параметров i -й операции.

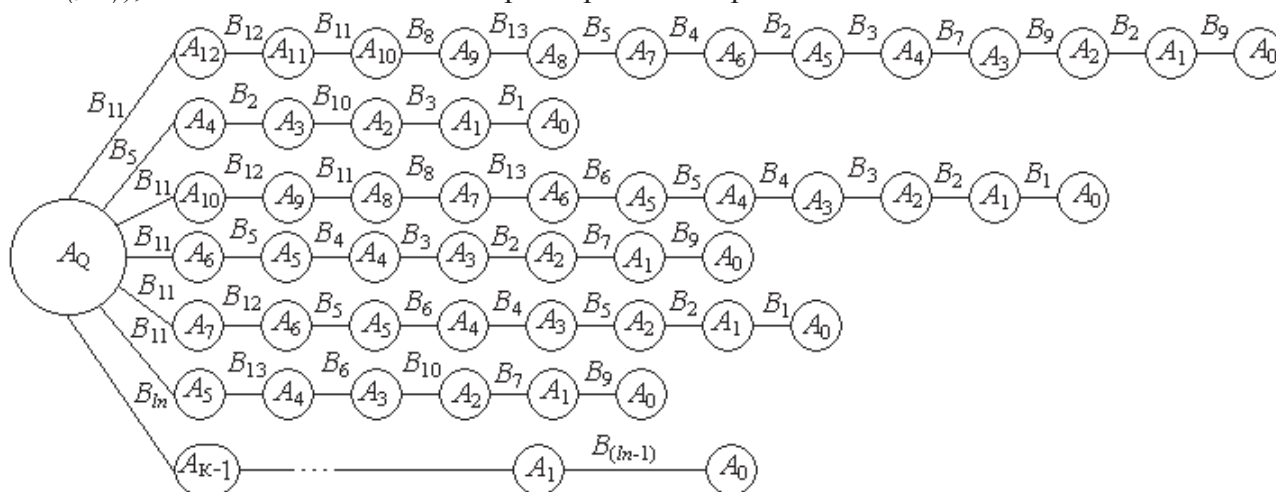


Рисунок 3. Дерево графов возможных структурных схем технологических процессов изготовления зубчатого колеса

Все многообразие возможных поэтапных состояний зубчатого колеса в процессе его изготовления можно представить множеством $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$; где: a_1, a_2, \dots, a_n – подмножества, характеризующие поэтапные состояния каждого варианта, а индекс « n » – номер варианта.

Для любого варианта технологического процесса подмножество a_n можно записать в виде: $a_n = \{A_0, A_1, A_2, \dots, A_i\}$. Каждое ребро из множества $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$; где m – количество операций, с помощью которых можно реализовать n – й этап обработки зубчатого колеса, а B_1, B_2, B_m – операции реализации этапа.

Рассматривая технологический процесс изготовления зубчатого колеса как технологическую систему помимо математического описания его структуры необходимо разработать формализованную модель, описывающую его функцию. Функция технологического процесса заключается в преобразовании исходного материала или полуфабриката в готовое изделие.

При осуществлении технологических процессов обработки зубчатых колес происходят

структурные изменения объектов производства, в результате которых изменяются их качественные и количественные характеристики. В результате функция технологического процесса может быть описана отображением $Q: A_0 \rightarrow A_i$.

Преобразование Q является сложным. В соответствии с разделением процесса изготовления колеса на этапы общая функция « F » расчленяется на ряд поэтапных функций, каждая из которых заключается в преобразовании зубчатого колеса из одного промежуточного состояния в другое.

Отображение $B_n: A_{(i-1)} \rightarrow A_i$ интерпретируется ребром графа. В целом функция технологического процесса изготовления зубчатого колеса может быть описана графом $F(A, Q)$:

$$F(FQ) = A_0 B_{(mn-1)} A_1 \dots A_{i-1} B_{(mn)} A_j.$$

Этот граф представляет собой объединение графов-функций отдельных операций. Но так как любой этап каждого конкретного варианта технологического процесса реализуется с помощью только одной из операций всей совокупности возможных операций реализации данного этапа, то переход отображения $B_{mn}: A_{i-1} \rightarrow A_i$

Связь между этими состояниями в целом определяется бинарными отношениями упорядоченных пар элементов множеств A_{i-1} и A_i .

Качественная определенность процесса зубообработки обусловлена его структурой, под которой понимается совокупность устойчивых отношений между частями технологического процесса. Различное взаимное расположение операций в технологическом процессе оказывает существенное влияние на его структуру. Изменение качественного состава и количества зубообрабатывающих операций при обработке одного и того же зубчатого колеса вызывает изменение структуры технологического процесса.

Принимая приведенные затраты за обобщенный критерий эффективности изготовления среднемодульных зубчатых колес, их можно представить в виде: $Z_{п.з} = C_m + \sum C_{xi} + E_n \sum K_{ni}$; где: C_m - сумма затрат на заготовку под механическую обработку; C_{xi} - технологическая себестоимость операций изготовления зубчатого колеса; E_n - нормативный коэффициент экономической эффективности; K_{ni} - величина капитальных вложений в оборудование для реализации технологического процесса.

Целью задачи повышения эффективности изготовления зубчатых колес является обеспечение условия $Z_{п.з} = \min$, при оптимальных значениях C_m , C_{xi} и K_{ni} , когда:

$$C_m \rightarrow \min; \quad C_{xi} \rightarrow \min; \quad K_{ni} \rightarrow \min.$$

Оптимальные значения этих параметров могут быть при значениях технологических переменных параметров каждой операции, образующих множество D_{oi} (при $D_{oi} \in D_i$). Эти значения технологических параметров определяются в результате решения задачи повышения эффективности обработки на уровне параметрической оптимизации каждой операции с учетом информации о границах регулирования технологических параметров. Таким образом

$$\min C_n(D_{oi}) D_{oi} \in D_i \quad \min K_{ni}(D_{oi}).$$

Оптимальное соотношение C_m , C_{xi} и K_{ni} , обеспечивающее $Z_{п.з} = \min$, определяется в результате структурной оптимизации и поиска соответствующего варианта технологического процесса.

Процесс формообразования зубчатого венца цилиндрического колеса можно представить как процесс последовательного удаления или перераспределения металла из впадины между зубьями.

Каждая зубообрабатывающая операция характеризуется, прежде всего, способом воздействия на металл (резанием или пластическим деформированием – рисунок 4), предопределяющим и способ формообразования зубчатого венца (рисунок 5).

Рассматривая процесс последовательного формообразования зубчатого венца, можно заметить, что на каждой последующей операции должен быть удален объем металла V_{i+1} , определяемый точностью удаления или перераспределения объема V_i на выполняемой операции. Полный объем металла, удаляемый из впадин зубчатого венца при зубообработке, можно вы-

числить по формуле: $V_y = S_{\text{вп}} b_w Z_k = p b_w m^2 (Z_k + 1) / \cos \beta$, мм; где: $S_{\text{вп}}$ - площадь впадины между соседними зубьями окончательно обработанного колеса в нормальном сечении; m_n - нормальный модуль колеса; b_w - ширина зубчатого венца, мм; Z_k - число зубьев колеса; β - угол наклона зубьев.

$$S_{\text{вп}} = 2 \left[\int f(y) dy + \int \varphi(y) dy + \int \psi(y) dy + \right] \text{мм}^2;$$

где: $f(y)$ - функция, описывающая переходную кривую зуба (дуга de); $\varphi(y)$ - функция, описывающая рабочий участок профиля зуба (дуга ea).

Объем металла, удаляемый на черновой операции, определяется исходя из формулы: $V_{\text{чер}} = (S - S_{i+k}) b_w Z_k$, мм³; где: S_{i+k} - площадь слоя металла, удаляемого на операциях отделочной обработки (k - количество зубоотделочных операций).

Величину этого показателя можно вычислить по формуле:

$$S_{i+k} = 2 L_{\text{эв}} (Z_{\text{мин}} K_{\phi} + 0,5 T_w), \text{мм}^2;$$

где: $L_{\text{эв}} = 0,5 r_b \left[\left(\frac{r_a}{r_b} \right)^2 - 1 \right]$ - длина рабочего (эвольвентного) участка профиля зуба; T_w - допуск на длину общей нормали на первой отделочной операции; K_{ϕ} - коэффициент формы припуска ($K_{\phi} = 1$ для равномерного припуска и $K_{\phi} = 0,6$ для клинового).

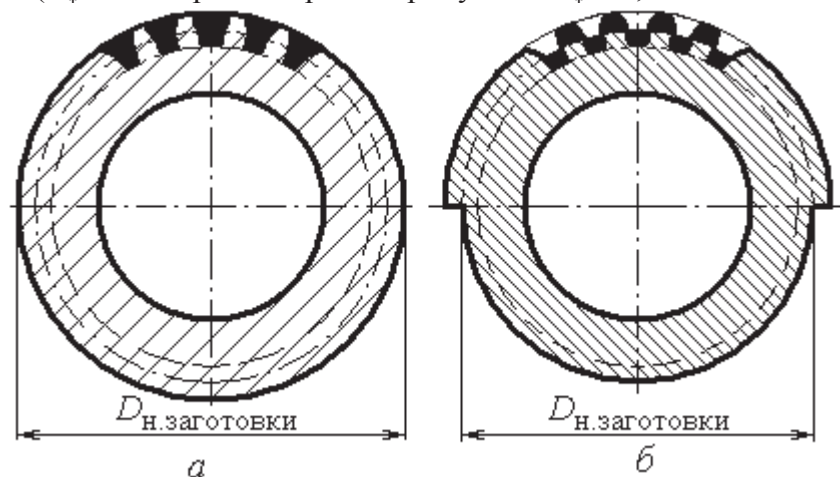


Рисунок 4. Воздействие на металл заготовки зубчатого колеса резанием (а) и пластическим деформированием (б)

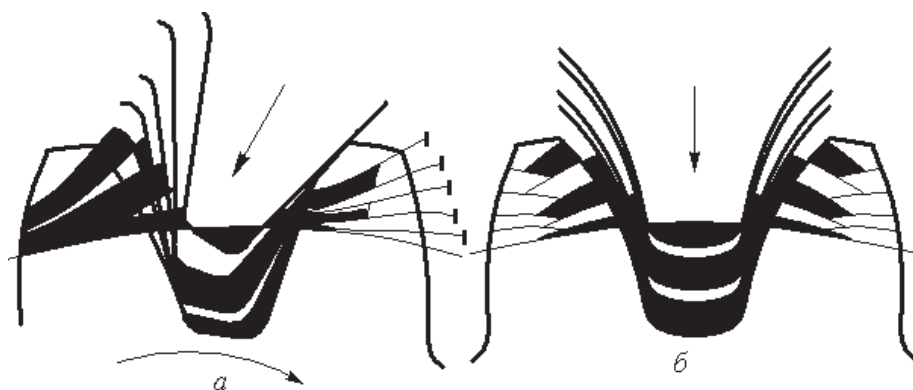


Рисунок 5. Формообразование зубчатого венца методами обката (а) и копирования (б)

Объем металла, удаляемого из впадин зубчатого венца на зубоотделочной операции, определяется исходя из формулы: $V_{\text{отд.}i} = S_i b_w Z_k$, мм³; где: S_i - площадь слоя металла, удаляемого на операции.

Таким образом, параметрическую оптимизацию i -й операции обработки зубчатого венца можно представить как процедуру определения условий удаления заданного объема ме-

талла V_i из впадин зубьев, обеспечивающих получение оптимальных значений выходных параметров операции. Эти условия определяются исходными данными и конкретными значениями параметров обрабатываемой операции (множеством d_{oi}), связанными между собой сложными зависимостями.

Параметрическая оптимизация зубообрабатывающей операции выполняется по итерационным процедурам с использованием средних значений стохастически изменяющихся параметров (при расчете показателей эффективности операции и управляющих воздействий) и предельных значений (при проверке ограничений). Задача параметрической оптимизации операции рассматривается как многокритериальная и решается методом последовательных уступок.

Последовательность выполнения параметрической оптимизации зубообрабатывающей операции представлена блок-схемой алгоритмов (рисунок 6), разработанной на основе ее формализованной модели.

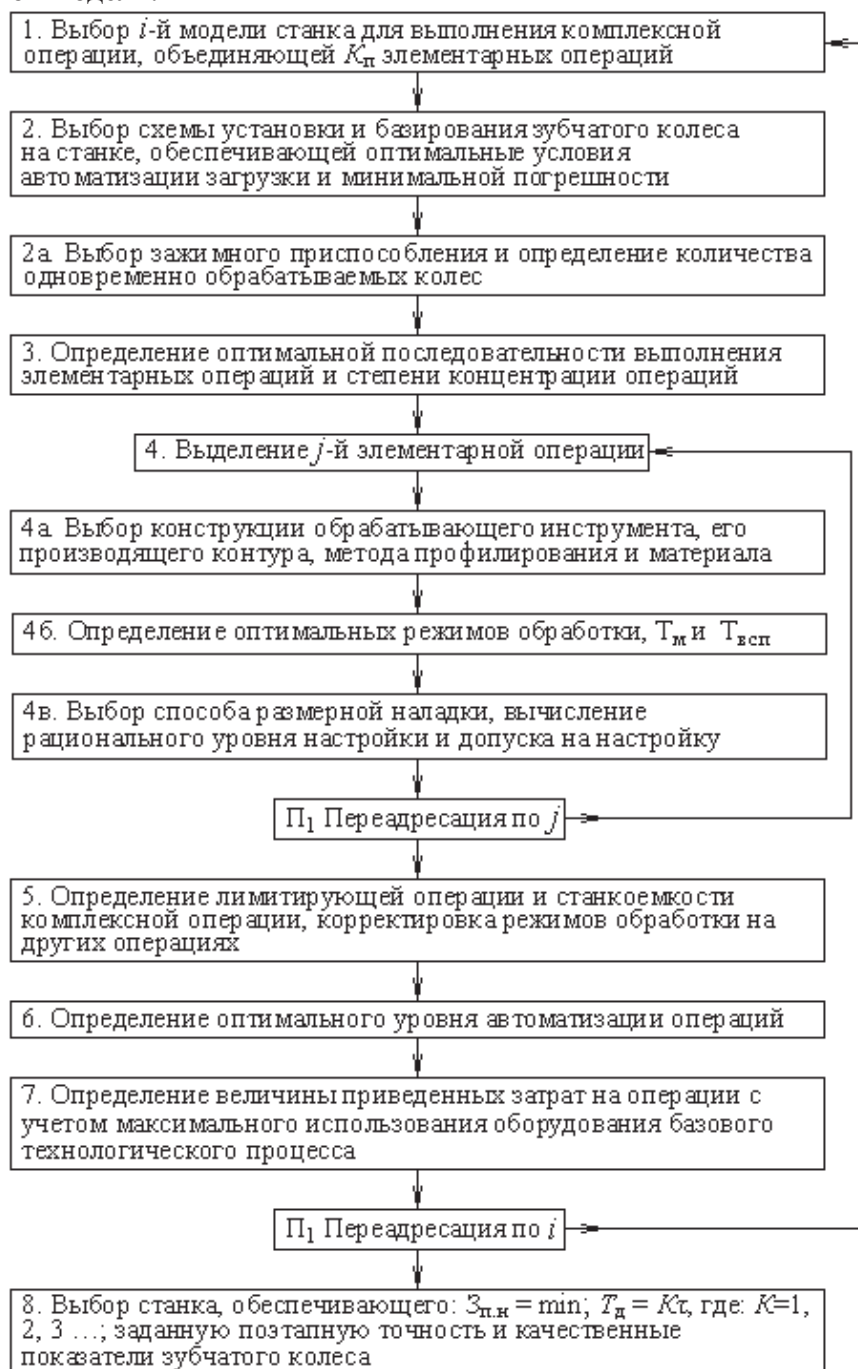


Рисунок 6. Блок-схема алгоритмов последовательности выполнения параметров оптимизации зубообрабатывающей операции

Формирование массива исходных данных для параметрической оптимизации i -й операции производится на основании синтеза тех входных и выходных технологических параметров, величины которых заданы в результате выполнения параметрической оптимизации всего технологического процесса изготовления зубчатого колеса.

Объем металла, удаляемый из впадин зубчатого венца на выполняемой операции, определяется по вышеприведенным формулам в зависимости от ее вида. При выборе моделей станков, конструкций установочно-зажимных приспособлений и обрабатывающего инструмента используются информационно-логические таблицы, составленные на основе номенклатуры станков и технологической оснастки, обеспечивающей возможность выполнения оптимизируемой операции в условиях рассматриваемого предприятия при заданном способе воздействия на металл заготовки зубчатого колеса.

Конструкция обрабатывающего инструмента, его производящий контур и материал выбираются с помощью обобщенного табличного алгоритма. Этот алгоритм используют и при определении ориентировочных затрат на оснастку.

Предварительное выявление потребного количества зубообрабатывающих станков на годовой выпуск зубчатых колес выполняется на основе определения величины $Q_{i \max}$ – максимально достижимой интенсивности удаления металла из впадин зубчатого венца на рассматриваемом (j) станке, имеющем свои особенности для черновых и отделочных зубообрабатывающих операций.

Подавляющее большинство отечественных и зарубежных зуборезных станков для предварительной обработки зубчатых венцов имеет значительный запас мощности привода главного движения. Основным ограничением при скоростном резании является, как правило, виброустойчивость станка из-за недостаточной жесткости технологической системы станок-инструмент-оснастка и значительных усилий чернового зубонарезания. В условиях крупносерийного производства зубчатых колес высокая производительность зубонарезания предопределяет экономические условия эксплуатации станков, а, следовательно, обработка в этом случае ведется на таких режимах, когда следует ожидать появления значительных вибраций в процессе резания. В настоящее время многими авторами в качестве критерия вибрационной устойчивости станков выбирается коэффициент запаса устойчивости K_v , равный отношению критической амплитуды виброперемещений $Y_{кр}$ профилирующих зубьев инструмента к максимальному перемещению Y_{\max} , имеющему место при режимах резания, установленных на станке. В качестве критической амплитуды относительных виброперемещений принимается амплитуда колебательного процесса, при котором происходит отрыв режущей кромки инструмента от нарезаемой заготовки. Как показали исследования, величина $Y_{кр}$ может быть взята равной величине расчетного припуска на обработку на данной операции $Z_{\text{расч.}i}$.

Коэффициент запаса устойчивости согласно работе [20] при определенной подаче на зуб инструмента S_z определяется по формуле: $K_y = \frac{y_k}{y_{\max}} = \frac{C_{\Sigma i}}{A + BV_{\text{рез}}}$.

Этот коэффициент имеет различные значения при разных режимах резания ($V_{\text{рез}}$ и S_z) и поэтому может служить наглядной характеристикой потенциальных возможностей зубообрабатывающего станка по производительности. В последней формуле постоянные C_{Σ} , A и B , определяемые империческим путем для каждого значения подачи S_z , зависят от вида выполняемой операции, режимов обработки, материала заготовки, его твердости и других факторов. Анализируя эту формулу, нетрудно заметить, что каждому значению подачи S_z при минимально допустимом значении $K_{y \min}$ соответствует определенная величина скорости резания $V_{\text{рез}}$. Эта величина представляет собой ту критическую скорость резания $V_{кр}$, при превышении которой процесс резания переходит в зону неустойчивого процесса. Таким образом, минимальное время удаления металла из впадин заданного зубчатого венца (отмечен индексом «0») $T_{\text{ген.}0}$ можно определить по формуле: $T_{\text{ген.}0} = \frac{b_{w0} Z_{к.0} p D_{\text{ин.}0}}{1000 S_{z0} V_{кр.0} g}$, мин; где: b_{w0} – ширина зубчатого венца; $Z_{к.0}$ и $Z_{\text{ин.}0}$ – числа зубьев обрабатываемого венца и инструмента соответ-

венно; $D_{ин.0}$ – диаметр инструмента; g – число позиций станка или заходов инструмента. При заданном S_{z0} критическая скорость определяется по зависимости: $V_{к.0} = (C_{\Sigma} - AK_{ymin})K_{ymin}B$.

Зная объем металла, удаляемого из впадин заданного зубчатого венца, и минимальное время процесса генерации, можно определить величину максимально достижимой интенсивности удаления металла в единицу времени:

$$Q_{i\max} = \frac{V_0}{T_{ген.0}} = \frac{1000Z_{ин.0}V_{кр.0}S_{вп}S_{s0}g}{\rho D_{ин.0}}, \frac{\text{мм}^3}{\text{мин}}$$

Так как $V_{кр}$ зависит от жесткостных характеристик технологической системы «станок-оснастка-инструмент» и параметров качества заготовок обрабатываемых зубчатых колес, то каждый зубообрабатывающий станок характеризуется определенным значением $Q_{i\max}$, являющимся мерой его производительности.

Для зубоотделочных операций, где силовой фактор и нагрузки на единицу длины режущего лезвия имеют второстепенное значение, максимальную интенсивность удаления металла из впадин зубчатого венца следует определять исходя из допустимой высоты гребешков – огранки профиля.

На основании изложенного можно сделать вывод, что использование в качестве математической модели зубообрабатывающей операции ориентированного ациклического графа отношений позволяет установить оптимальное взаимодействие большинства технологических факторов, определяющих протекание операции в конкретных производственных условиях, и тем самым реализовать оптимальные технологические процессы зубообработки в конкретных производственных условиях.

Предложенный в работе подход к вопросу оптимизации операций позволяет наиболее полно учитывать потенциальные возможности зубообрабатывающего оборудования действующего производства и полнее реализовать резервы конкретного предприятия путем широкого внедрения в производство систем автоматического проектирования технологических процессов.

Литература

1. Виноградов В.М., Черепяхин А.А. Влияние метода зубонарезания на изгибную прочность зубьев цилиндрических колес автомобилей и тракторов. // Известия МГТУ «МАМИ». 2009. Т. 1. № 2. с. 136-141.
2. Максимов Ю.В., Абрамова А.Р., Кузьминский Д.Л., Мокринская А.Ю. К вопросу об обеспечении качества обработки сложнопрофильных деталей на станках с изменяющимися элементами // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. Т. 1. № 1. с. 168-174.
3. Виноградов В.М., Черепяхин А.А. Критерии оптимизации зубообрабатывающих операций, основанных на различных методах формообразования зубьев. // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. Т. 2. № 2. с. 238-242.
4. Виноградов В.М., Черепяхин А.А., Кузнецов В.А., Клепиков В.В. Круговое протягивание зубчатых колес автомобильных трансмиссий. Монография. – М.: Форум, 2011 – 176 с.
5. Таратынов О.В., Клепиков В.В. Новые концепции совершенствования технологических систем в машиностроительной промышленности. // Вестник машиностроения. 2005. № 8. с. 51-58.
6. Виноградов В.М., Черепяхин А.А., Буянов А.С. Обоснование выбора наиболее рациональной схемы профильного накатывания. // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 6. с. 36-37.
7. Калашников А.С., Моргунов Ю.А., Калашников П.А. Современные технологические процессы изготовления цилиндрических зубчатых передач. // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2006. № 4. с. 10-13.
8. Кузнецов В.А., Черепяхин А.А., Колтунов И.И., Шлыкова А.В. Технологические процессы машиностроительного производства. / М.. изд. Форум, 2010 – 528 с.