

# СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЗУБЬЕВ МУФТ

Михайлов А.Н., Гитуни А., Лахин А.М., Грубка Р.М., Михайлов Д.А.  
(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

*Represented work gives the general theoretical approach of an improvement in the quality and effectiveness in the manufacture of the tooth of clutches with the special geometry of side. The geometry of tooth proposed ensures uniform load distribution between the tooth and linear contact of their working surfaces. In the work the general methodology of the manufacture of the tooth of clutches with the special geometry of working surfaces is developed. This methodology based on the development of a number of the structural versions of technological processes on the base of the principle of the successive approximation of the geometry of the tooth of clutches to theoretically precise. Work gives the method of working the special geometry of the tooth of clutches from the working surface which is theoretically precise*

## 1. Введение

В настоящее время в различных отраслях народного хозяйства широко используются зубчатые муфты для соединения валов технологических систем работающих в условиях наличия перекосов и смещений соединяемых валов. При этом с увеличением быстроходности и нагруженности зубчатых муфт широко применяются

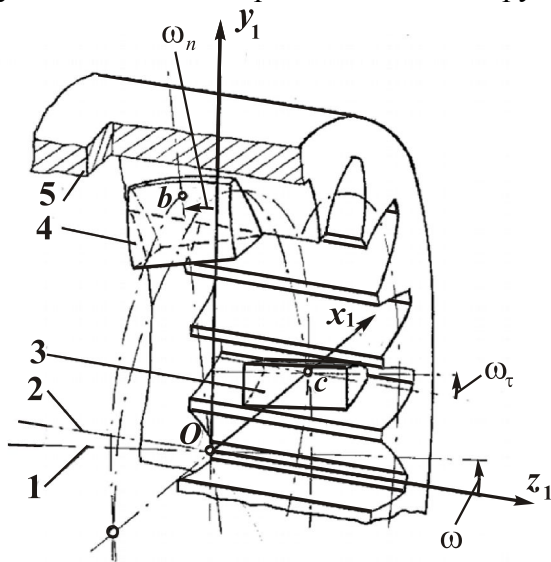


Рис. 1. Особые положения зубьев центрируемой муфты при наличии перекоса осей втулки относительно обоймы  $\omega$

зубчатые муфты с зубьями, имеющими бочкообразную форму рабочей поверхности. Вместе с тем, применяемая геометрия рабочей поверхности зубьев не позволяет в полной мере исключить неравномерное распределение нагрузки в зацеплении зубчатой муфты и устранить возникающие кромочные контакты зубьев в условиях наличия перекосов зубьев относительно друг друга (рис. 1) [1].

На рис. 1 показаны особые положения зубьев центрируемой муфты при наличии перекоса осей втулки относительно обоймы  $\omega$ . Здесь показано: 1 - ось наружного зубчатого венца, 2 - ось внутреннего зубчатого венца, 3 - зуб наружного зубчатого венца (втулки), 4 - зуб внутреннего зубчатого венца (обоймы), 5 - внутренний зубчатый венец (обойма). В точках  $b$  и  $c$  особые положения зубьев втулки относительно обоймы.

Поэтому для обеспечения выравнивания нагрузки в зацеплении зубьев зубчатых муфт и реализации линейных контактов рабочих зубьев муфт, работающих в условиях перекосов и смещений осей, разработана специальная геометрия зубьев, именуемая пространственно-модифицированная геометрия зубьев муфт [2, 3, 4]. Эта геометрия зубьев муфты обеспечивает выравнивание нагрузки в зацеплении и линейный контакт

рабочих поверхностей зубьев при наличии их перекося для центрируемых зубчатых муфт. Это связано с тем, что процесс получения пространственно-модифицированных зубьев муфты основан на разработанном способе обработки, базирующемся на втором способе Оливье и выполнении в процессе изготовления зубьев двух принципов [1].

Вместе с тем, можно отметить, что технология получения пространственно-модифицированной геометрии зубьев основанная на втором способе Оливье не позволяет получать заданную геометрию высокопроизводительными способами. Это связано с тем, что для осуществления обработки с использованием второго способа Оливье применима только хонинговальная операция с использованием внутреннего зацепления инструмента и обрабатываемых зубьев втулки муфты. При этом снимаемый припуск при хонинговании зубьев обычно составляет 50 ... 70 мкм. Поэтому этим методом снимать большие припуски для пространственно-модифицированных зубьев, в ряде случаев, является длительным низко производительным процессом, а для зубьев крупного модуля вообще не представляется возможным. Это не позволяет получать точную пространственно модифицированную геометрию зубьев муфт.

На основании выше изложенных доводов, целесообразно выполнять предварительное изготовление зубьев, с геометрией рабочей поверхности близкой к пространственно-модифицированной, но получаемой высокопроизводительными методами. При этом на завершающей операции предлагается получать точную пространственную модификацию зубьев, обработка которой основывается на втором способе Оливье. В этом случае, припуски на обработку можно закладывать в пределах до 70 мкм и получать необходимую пространственно-модифицированную геометрию зубьев муфт.

Однако, для решения этих вопросов необходима разработка определенной структуры технологического процесса, обеспечивающего высококачественными и высокопроизводительными способами изготовление пространственно-модифицированной геометрии зубьев муфт.

Целью данной работы является повышение качества и эффективности изготовления пространственно-модифицированных зубьев муфт на основе разработки общего подхода, методологии и принципов синтеза структуры технологического процесса и обеспечения, базирующихся на последовательном приближении геометрии рабочей поверхности зубьев к теоретически точной пространственно-модифицированной геометрии, получаемой с использованием второго способа Оливье [1].

В соответствии с поставленной целью в работе планируется решить следующие задачи: разработать общий подход последовательного приближения геометрии рабочей поверхности зубьев к теоретически точной пространственно-модифицированной геометрии, получаемой с использованием второго способа Оливье; разработать общую методику и принципы синтеза структуры технологического процесса и обеспечения последовательного приближения геометрии рабочей поверхности зубьев к теоретически точной пространственно-модифицированной геометрии; разработать конкретный технологический процесс приближения геометрии рабочей поверхности зубьев к теоретически точной пространственно-модифицированной геометрии; разработать способ и устройство изготовления теоретически точной пространственно-модифицированной геометрии зубьев муфт, получаемой с использованием второго способа Оливье.

## **2. Основное содержание и результаты работы**

Общий теоретический подход последовательного приближения геометрии рабочей поверхности зубьев к теоретически точной пространственно-

модифицированной геометрии (ПМЗМ), получаемой с использованием второго способа Оливье, базируется на следующих **основных принципах**:

1. Комплексности обеспечения качества и эффективности изготовления ПМЗМ.
2. На базе предельного критерия качества и эффективности изготовления ПМЗМ.
3. Рекуррентность проектирования структуры технологического процесса изготовления ПМЗМ.
4. Обеспечения линейного контакта зубьев и выравнивания нагрузки в зацеплении ПМЗМ.
5. Последовательного приближения структуры и параметров технологического процесса изготовления ПМЗМ ко второму способу Оливье.

Можно отметить, что **принцип комплексности** обеспечения качества и эффективности изготовления ПМЗМ обеспечивает на всех этапах комплексного технологического процесса решение вопросов обеспечения и качества и эффективности изготовления ПМЗМ. Только комплексный подход в создании структуры технологического процесса изготовления ПМЗМ и комплексный подход в обеспечении качества и эффективности их изготовления дает возможность решать вопросы эффективного изготовления ПМЗМ и эксплуатации зубчатых муфт.

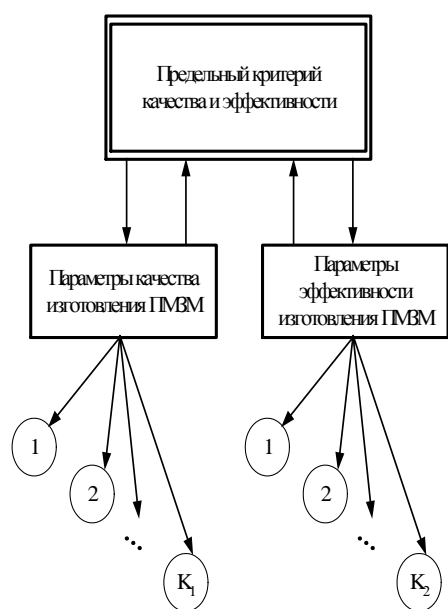


Рис. 2. Гипотетическая схема связей при обеспечении параметров качества и эффективности изготовления ПМЗМ

Вместе с тем, только на базе **предельного критерия качества и эффективности** изготовления ПМЗМ возможно создание наиболее качественной геометрии ПМЗМ, эффективными методами. Поэтому **предлагаемый принцип** обеспечения предельного критерия качества и эффективности изготовления ПМЗМ является одним из основных задач в решении вопросов изготовления ПМЗМ. На рис. 2 приведена гипотетическая схема связей при обеспечении параметров качества и эффективности изготовления ПМЗМ. Эти связи непрерывно необходимо учитывать при разработке структуры технологического процесса изготовления ПМЗМ на всех этапах комплексного технологического процесса.

Заметим, что использование **принципа рекуррентности** проектирования структуры технологического процесса изготовления ПМЗМ дает возможность, как последовательно решать вопросы синтеза необходимой структуры технологического процесса изготовления ПМЗМ, так и с необходимыми переходами вперед и назад к определенным этапам

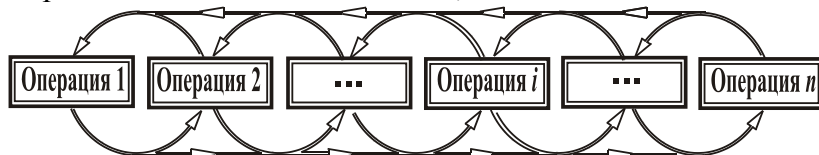


Рис. 3. Рекуррентный процесс синтеза структуры технологического процесса изготовления ПМЗМ

комплексного технологического процесса. При этом постоянно обеспечивается поддержание обратных связей между отдельными этапами комплексного

технологического процесса. Этот принцип дает возможность решать вопросы комплексного создания рациональных или оптимальных структурных вариантов технологических процессов изготовления ПМЗМ. На рис. 3 представлена схема рекуррентного процесса синтеза структуры технологического процесса изготовления ПМЗМ. Здесь показано множество технологических операций технологического процесса изготовления ПМЗМ  $Str = \{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$  рекуррентно связанных между собой последовательными прямыми и возвратными связями.

Для зубчатых муфт работающих в условиях перекосов зубьев характерно неравномерное распределение нагрузки между зубьями по периметру зацепления, а так же наличие кромочных контактов, возникающих у торца зубьев и по вершинам из-за наличия нормальных  $\omega_n$  и тангенциальных  $\omega_t$  углов перекоса зубьев относительно

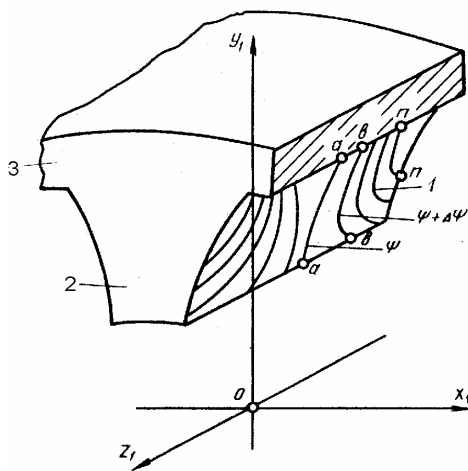


Рис. 4. Схема линейного контакта зубьев ПМЗМ

друг друга (рис. 1). Поэтому важнейшей задачей синтеза геометрии зубьев и технологии их изготовления является разработка мероприятий исключающих эти явление. В связи с этим **принцип обеспечения линейного контакта зубьев** (рис 4) и **выравнивания нагрузки** в зацеплении ПМЗМ (рис. 5) является одной из главных задач синтеза такой геометрии и разработки технологического процесса для ее получения.

На рис. 4 показан линейный контакт 1 сопряженных поверхностей пространственно-модифицированной поверхности зубьев втулки и обычной эвольвентной поверхности зуба 2 обоймы 3 муфты, представленный линиями. Здесь показаны: линия контакта *a-a* при параметрическом угле поворота муфты  $\psi$ ; линия контакта *b-b* при угле  $\psi + \Delta\psi$  и так далее до линий контакта *n-n*. На рис. 5 показана эпюра

распределения нагрузки ПМЗМ при наличии перекоса осей элементов. Здесь показано, что нагрузка в зацеплении равномерно распределяется между зубьями во II и VI четвертях по периметру зацепления зубьев. При этом нагрузка (без учета погрешностей шага зубьев) равномерно распределяется между зубьями зацепления величиной  $P_0$ .

Разрабатываемая технология, базирующаяся на втором способе Оливье [1] изготовления сопряженных поверхностей позволяет изготавливать геометрию зубьев с линейным контактом рабочих поверхностей и равномерным распределением нагрузки между зубьями [2, 3, 4].

Второй способ Оливье изготовления пространственных зацеплений с линейным касанием поверхностей зубцов основывается на двух условиях:

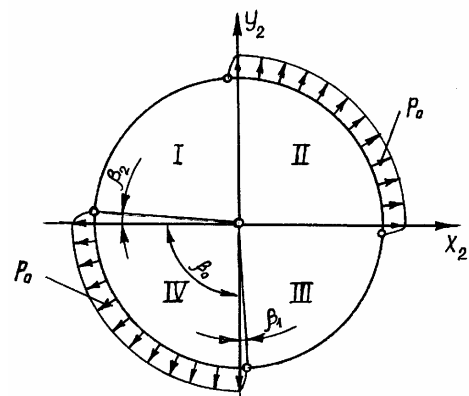


Рис. 5. Эпюра распределения нагрузки ПМЗМ при наличии перекоса осей элементов

1. Нарезание поверхности зубцов одного из звеньев механизма (зубчатой муфты) должен производиться инструментальной поверхностью, полностью совпадающей с поверхностью другого звена в передаче (зубчатой муфты).

2. При изготовлении зубьев муфты на технологической системе структура относительных движений инструмента и заготовки должна быть такая же, какая имеется в зубчатом механизме (зубчатой муфте) при эксплуатации.

Основываясь на втором способе Оливье для второго условия Оливье, разработана структура движений при преобразовании систем координат в относительных движениях огибающей и огибаемой поверхностей зубьев ПМЗМ при наличии перекоса осей. На рис. 6 представлены структура относительных движений систем для получения пространственно-модифицированной поверхности зубьев.

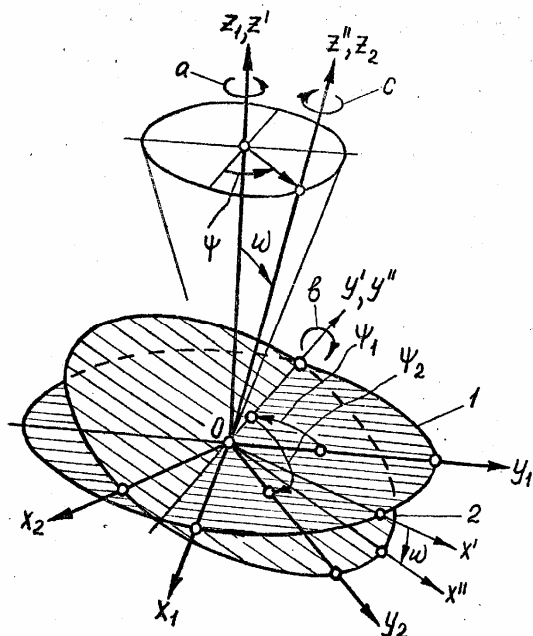


Рис. 6. Структура движений при преобразовании систем координат в относительных движениях огибающей и огибаемой поверхностей зубьев ПМЗМ при наличии перекоса осей

Как известно из аналитической геометрии, от системы координат  $x_1, y_1, z_1$  к системе координат  $x_2, y_2, z_2$ , имеющих единое начало координат, можно перейти при помощи последовательного выполнения трех поворотов  $a, b, c$  (рис.6) вокруг себя осей координат путем задания трех углов Эйлера в трехмерном евклидовом векторном пространстве.

Сначала нужно повернуть систему  $x_1, y_1, z_1$  вокруг оси  $Oz_1$  на угол  $\psi_1$ , получим систему координат  $x', y', z'$  - вокруг оси  $Oy'$  на угол  $\omega$ , получим систему  $x'', y'', z''$ . Далее, поворачивая систему  $x'', y'', z''$  - около оси  $Oz''$  на угол  $\psi_2$ , получим систему  $x_2, y_2, z_2$ . Для выполнения второго условия второго способа Оливье необходимо чтобы углы  $\psi_1$  и  $\psi_2$  были равны и отображались

$$\psi_1 = \psi_2 = \psi,$$

где  $\psi$  - угол поворота зацепления.

Для решения вопроса реализации первого условия второго способа Оливье необходимо выполнить инструмент в виде

эвольвентной поверхности. В координатной записи уравнения эвольвентного профиля инструмента имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= r_b [\sin(\varphi - \varphi_c) - \varphi \cos(\varphi - \varphi_c)]; \\ y_1 &= r_b [\cos(\varphi - \varphi_c) + \varphi \sin(\varphi - \varphi_c)]; \\ z_1 &= r_b \operatorname{tg} v. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $r_b$  – радиус основного цилиндра инструмента;

$\varphi$  - параметрический угол эвольвенты;

$v$  – параметрический угол точки в продольном сечении.

Здесь

$$\varphi_c = \frac{\pi}{2z} + inv\alpha_w,$$

где  $z$  – число зубьев инструмента;

$inv\alpha_w$  - эвольвентный угол, соответствующий точке профиля на делительном цилиндре.

Таким образом, второй способ Оливье дает возможность решать вопросы получения теоретически точной пространственно-модифицированной геометрии зубьев муфты. Поэтому в данной работе предложен способ и устройство для его осуществления, позволяющие на завершающей стадии технологического процесса доводить (хонинговать) рабочую поверхность ПМЗМ.

Вместе с тем, можно отметить, что технология получения пространственно-модифицированной геометрии зубьев основанная на втором способе Оливье не позволяет получать заданную геометрию высокопроизводительными способами. Это связано с тем, что для осуществления обработки с использованием второго способа Оливье применима только хонинговальная операция с использованием внутреннего зацепления инструмента и обрабатываемых зубьев втулки муфты. При этом снимаемый припуск при хонинговании зубьев обычно составляет 50 ... 70 мкм. Поэтому этим методом снимать большие припуски для пространственно-модифицированных зубьев, в ряде случаев, является длительным низко производительным процессом, а для зубьев крупного модуля вообще не представляется возможным. Это не позволяет получать точную пространственно модифицированную геометрию зубьев муфт.

На основании выше изложенных доводов, целесообразно выполнять предварительное изготовление зубьев, с геометрией рабочей поверхности близкой к пространственно-модифицированной, но получаемой высокопроизводительными методами. При этом на завершающей операции предлагается получать точную пространственную модификацию зубьев, обработка которой основывается на втором способе Оливье. В этом случае, припуски на обработку можно закладывать в пределах до 70 мкм и получать необходимую пространственно-модифицированную геометрию зубьев муфт.

Поэтому данная работа основывается на важнейшем технологическом **принципе последовательного приближения** структуры и параметров технологического процесса изготовления ПМЗМ ко второму способу Оливье.

Вместе с тем, только совместное использование приведенных выше принципов при проектировании технологии изготовления ПМЗМ дает возможность полностью решать вопросы комплексного повышения качества и эффективности изготовления

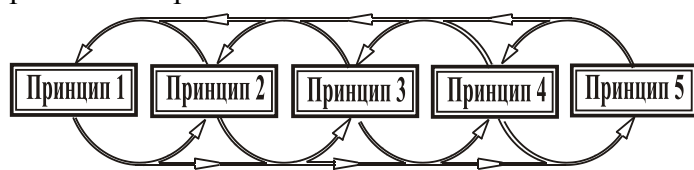


Рис. 7. Итерационная схема использования принципов проектирования в общем теоретическом подходе последовательного приближения геометрии рабочей поверхности зубьев к теоретически точной ПМЗМ

ПМЗМ. На рис. 7 приведена структурная схема итерационного подхода в использовании принципов при разработке комплексной технологии изготовления ПМЗМ. При этом итерационный подход позволяет комплексно и последовательно использовать предлагаемые принципы для создания прогрессивных технологий

изготовления ПМЗМ.

На рис. 8 представлена структурная схема общего подхода повышения качества и эффективности обработки ПМЗМ. Данный подход основывается, прежде всего, на использовании комплексного технологического процесса изготовления ПМЗМ состоящего из  $n$  различных технологических операциях, в которых предусматривается выполнение отдельных этапов технологического процесса, состоящего из следующих

этапов: операции черновой обработки, операции получистовой обработки, ..., операции отделочной обработки. При этом на каждом этапе комплексного технологического процесса предусматривается выполнение последовательного приближения получаемой геометрии к пространственно-модифицированной геометрии зубьев. А именно: для 1-го этапа комплексного технологического процесса приближение геометрии 1-го порядка, для 2-го этапа комплексного технологического процесса приближение геометрии 2-го порядка, ..., для  $k$ -го этапа комплексного технологического процесса приближение геометрии  $k$ -го порядка, ..., и так далее. При этом для  $n$ -го этапа комплексного технологического процесса или  $n$ -й операции технологического процесса предусматривается получение точной геометрии ПМЗМ. Здесь должна выполняться технологическая операция, основанная на применении операции хонингования на базе второго способа Оливье. Здесь для каждого этапа технологического процесса и каждого порядка приближения геометрии рабочей поверхности зубьев предусматривается соответствующее приближение структуры движений технологической системы и геометрии обрабатываемого инструмента к параметрам двух условий второго способа Оливье. Можно отметить, что на последней операции предусматривается выполнение точной пространственно-модифицированной геометрии зубьев. Потому в этом случае должны полностью выполняться два условия второго способа Оливье.

Следует отметить, что при разработке всех операций комплексного технологического процесса изготовления ПМЗМ разработку каждой операции необходимо вести на базе предельного критерия качества и эффективности изготовления зубчатых муфт. Из этих условий должна выполняться разработка структурного и параметрического обеспечения технологического процесса изготовления ПМЗМ. Только в этом случае обеспечивается высокое качество и эффективность изготовления ПМЗМ. На рис. 8 буквами  $V$  обозначен входной поток предметов обработки (заготовок зубчатых муфт),  $W$  - выходной поток изделий.

В соответствии с разработанным общим теоретическим подходом (рис. 8) разработана общая методика синтеза комплексного технологического процесса изготовления ПМЗМ:

1. Назначается первая операция комплексного технологического процесса.
2. Определяется кинематическая структура первой операции.
3. Определяется и назначается технологическое обеспечение первой операции.
4. Выполняется нахождение геометрических параметров боковой (приближенной) поверхности зубьев первой операции.
5. Определяется степень приближения геометрии зубьев муфты после первой операции к идеальной точной геометрии пространственно-модифицированных зубьев муфт:

$$\max(\Delta\Pi_{0.2,n}^1) = h_1,$$

где  $\Delta\Pi_{0.2,n}^1$  — приращение параметров реальной поверхности зубьев к идеальной точной геометрии пространственно-модифицированных зубьев муфт первой операции;  $h_1$  — максимальное значение приращения параметров реальной поверхности зубьев к идеальной точной геометрии пространственно-модифицированных зубьев муфт для первой операции.

6. Если  $h_1 > \delta_x$ , где  $\delta_x$  — припуск на хонингование, назначается вторая операция технологического процесса.

7. Определяется кинематическая структура второй операции.

8. Определяется и назначается технологическое обеспечение второй операции.

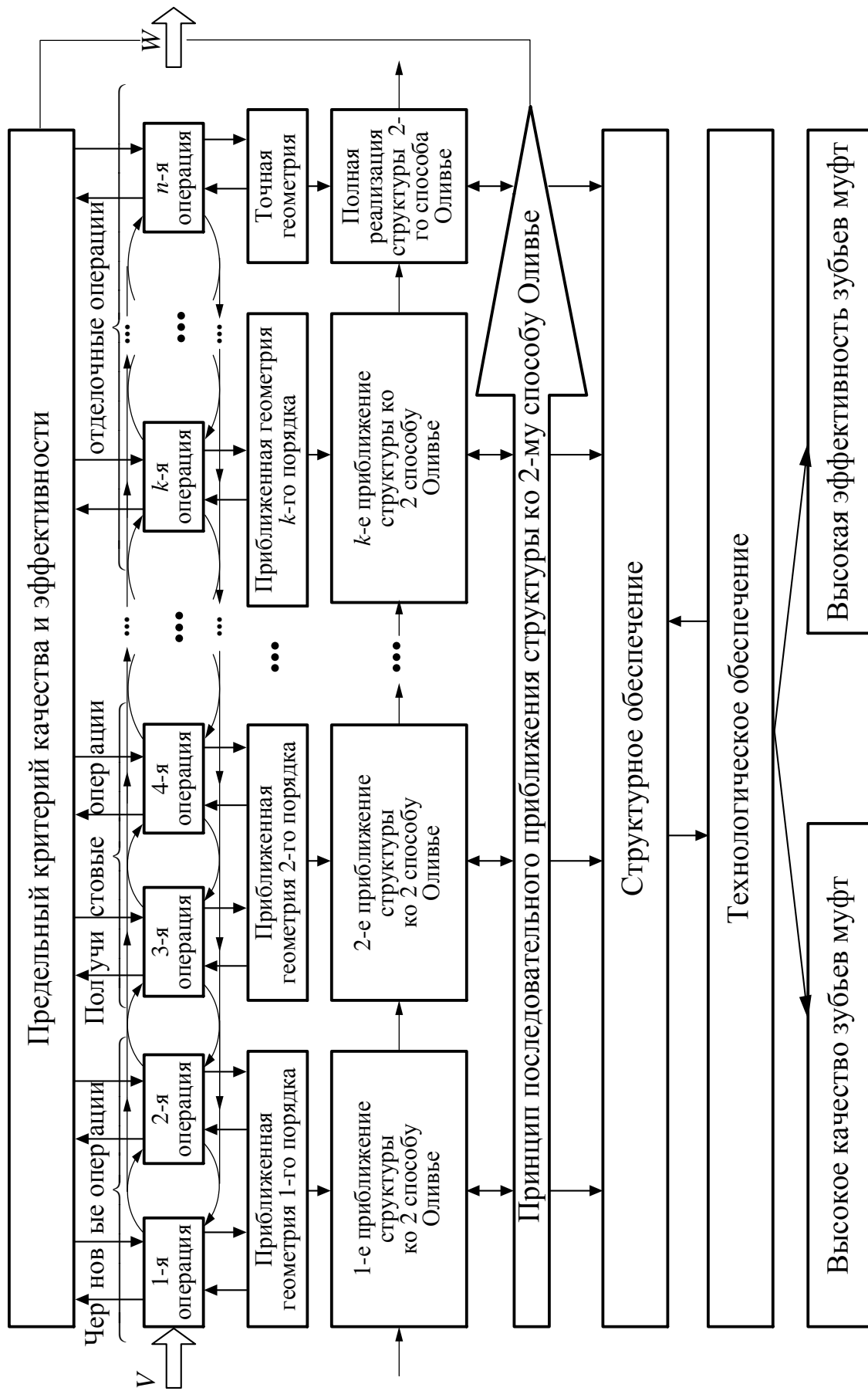


Рис. 8. Структурная схема общего подхода повышения качества и эффективности обработки ПМЗМ



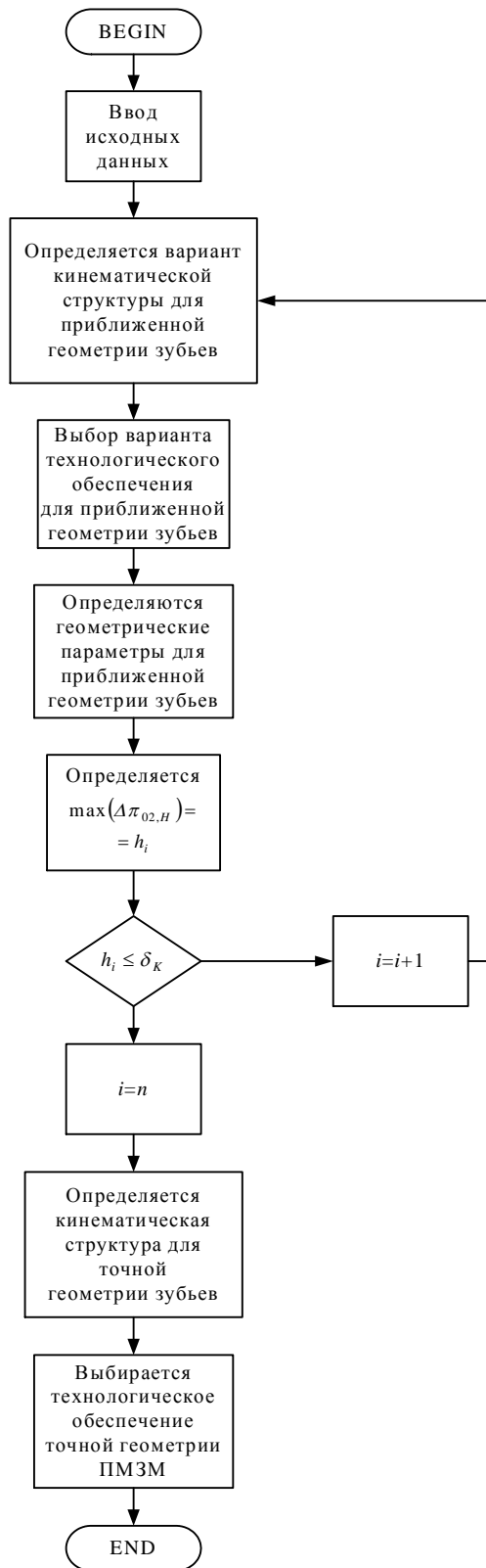


Рис. 9. Алгоритм общей методики синтеза структуры и технологического обеспечения пространственно-модифицированных зубьев муфт

9. Выполняется нахождение геометрических параметров боковой (приближенной) поверхности зубьев второй операции.

10. Определяется степень приближения геометрии зубьев муфты после второй операции к идеальной точной геометрии пространственно-модифицированных зубьев муфт:

$$\max(\Delta\Pi_{0.2,n}^2) = h_2,$$

где  $\Delta\Pi_{0.2,n}^2$  — приращение параметров реальной поверхности зубьев к идеальной точной геометрии пространственно-модифицированных зубьев муфт второй операции;

$h_2$  — максимальное значение приращения параметров реальной поверхности зубьев к идеальной точной геометрии пространственно-модифицированных зубьев муфт для второй операции.

R. Если  $h_{n-1} = \delta_x$ , назначается  $n$ -я операция комплексного технологического процесса, обеспечивающую точную геометрию пространственно-модифицированных зубьев муфт.

R+1. Определяется кинематическая структура  $n$ -й операции.

R+2. Определяется и назначается технологическое обеспечение  $n$ -й операции.

На рис. 9 представлен алгоритм общей методики синтеза структуры и технологического обеспечения пространственно-модифицированных зубьев муфт, последовательность которого полностью соответствует общей методике синтеза комплексного технологического процесса изготовления ПМЗМ, приведенной выше.

Таким образом, разработанный общий теоретический подход, методика и алгоритм создания структуры технологического процесса изготовления ПМЗМ основаны на реализации ряда принципов изготовления ПМЗМ и базируется на всех этапах технологического процесса на принципе последовательного приближения геометрии зубьев и структуры

технологического процесса к пространственно-модифицированной геометрии зубьев муфт.

Используя предложенные теоретические положения, разработана структура технологического процесса, включающая выполнение следующих операций:

1. Способа обработки зубьев муфт методом копирования. Он основывается на получении приближенной геометрии, получаемой фрезерованием модульными дисковыми фрезами с перемещением инструмента по линии смещения исходного контура по специальной линии. В этом случае линия смещения исходного контура определяется на основании точной геометрии ПМЗМ.

2. Способа обработки зубьев муфт методом обкатки. Он основывается на получении приближенной геометрии, получаемой фрезерованием модульными червячными фрезами с перемещением инструмента по линии смещения исходного контура по специальной линии. В этом случае линия смещения исходного контура также определяется на основании точной геометрии ПМЗМ.

3. Способа обработки зубьев муфт методом копирования или обкатки с обеспечением кинематической структуры движений при обработке идентичной эксплуатационной в механизме. Он основывается на получении приближенной геометрии фрезерованием модульными дисковыми или червячными фрезами. В этом случае выполняется только второе условие второго способа Оливье.

4. Способа обработки зубьев муфт методом обкатки с обеспечением кинематической структуры движений при обработке идентичной эксплуатационной в механизме. Он основывается на получении приближенной геометрии получаемой протягиванием специальными протяжками. В этом случае выполняется второе условие второго способа Оливье. При этом частично выполняется первое условие второго способа Оливье.

5. Разработка способа отделочной обработки. Реализация полной адекватности двух условий второго способа Оливье. Эта операция может выполняться или хонингованием или другими методами, например электроэрозионной обработкой.

Можно отметить, что две первые операции могут выполняться обычными традиционными методами с использованием перемещения инструмента по линии смещения исходного контура, параметры которой определены в работе [5]. При этом третья и четвертая операция может выполняться на специальном оборудовании, которое должно спроектировано в соответствии с изобретениями, представленными в работах [6, 7, 8]. А именно третья операция с использованием работ [6, 7], а четвертая в соответствии с работой [8].

Последняя операция базируется на получении точной пространственно-модифицированной геометрии зубьев муфт. В этом случае доводка может реализовываться хонингованием [9, 10] или электроэрозионным методом [11] с полным выполнением двух условий второго способа Оливье. При этом получаемая геометрия ПМЗМ будет полностью соответствовать точной геометрии.

Таким образом, приведенный комплекс технологических операций обеспечивает последовательное приближение геометрии зубьев к точной пространственно-модифицированной геометрии. Здесь, по ходу технологического процесса (до последней операции) выполняется частичное выполнение двух условий второго способа Оливье с последовательным увеличением степени их приближения к полному выполнению. При этом на последнем этапе технологического процесса реализуется точная пространственно-модифицированная геометрия зубьев муфты за счет выполнения двух условий Оливье и припусков, не превышающих нормированных значений.

В качестве примера приведем способ отделочной обработки зубьев втулки муфты хонингованием. Для этого сначала приведем специальный инструмент для выполнения процесса хонингования ПМЗМ.

Дисковый хон, изображенный на рис. 10,а, выбирают по его характеристике, в зависимости от свойств обрабатываемого материала, размеров зубчатого изделия и стакана, в который он устанавливается, режимов резания и требований, предъявляемых к обработке [9], его прочности и экономичности процесса. Хон состоит из двух элементов — металлической втулки 1 и абразивного венца 2 с внутренними зубьями. Ширина хона  $L$  определяется по следующей формуле:

$$L=B_1+A+2a. \quad (2)$$

Здесь

$$B_1=d_a \sin \omega + B \cos \omega,$$

где  $d_a$  — диаметр вершин зубьев изделия;

$B$  — ширина зубчатого венца изделия;

$\omega$  — угол перекоса осей инструмента относительно изделия;

$A$  — амплитуда возвратно-поступательного движения инструмента;

$a$  — запас неиспользуемой ширины инструмента.

На рис. 10,б показан общий вид дискового хона и форма для его изготовления.

Качество обработанной поверхности зубьев, производительность обработки и стойкость инструмента существенно зависят от того, насколько правильно и рационально выбраны режимы обработки. По предлагаемому способу [9] для достижения комплекса технологических показателей предусмотрено в процессе хонингования производить поворот инструмента относительно изделий вокруг оси, находящейся в плоскости симметрии центрального сечения зубчатого венца изделия. Это мероприятие обеспечивает одновременно получение точной оптимальной формы боковой поверхности зубьев изделия, повышает производительность за счет обработки всех зубьев сразу и увеличивает стойкость инструмента, так как нагрузка по его периметру распределяется по всем зубьям равномерно и нет перенагруженных.

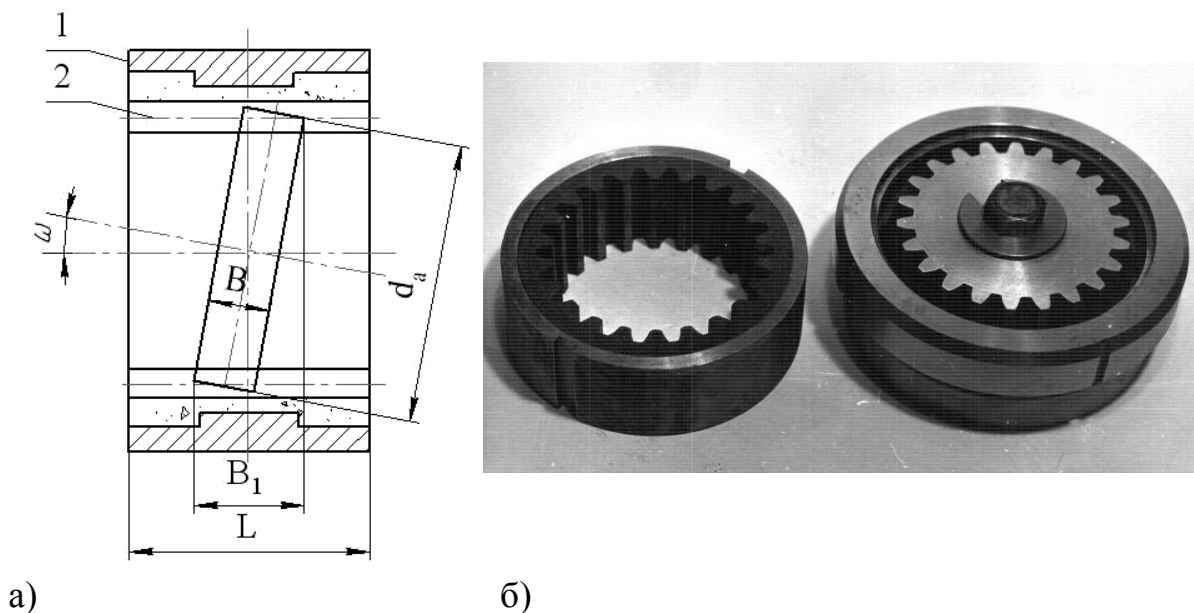


Рис. 10. Зубчатый хон внутреннего зацепления:

а) - продольное сечение, б) - общий вид и формы для получения хона

Однако здесь заметим, что этот поворот (доворот) инструмента необходимо осуществлять с определенной угловой скоростью. Так как большая скорость поворота инструмента не позволяет одновременно обрабатывать все зубья изделия и нагрузка по периметру зацепления хона распределяется неравномерно, концентрируясь на зубьях, находящихся около оси максимального их перекося. Поэтому эти зубья инструмента перенагруживаются и снижается стойкость инструмента. При малой скорости поворота инструмента снижается производительность обработки и повышается износ инструмента на одно изделие, так как снимается лишний слой металла при формировании боковой поверхности зубьев.

Процесс обработки боковой поверхности зубьев хонингованием в пространственном зацеплении инструмента и изделия является многофакторным процессом и учесть влияние всех факторов на технологические показатели обработки достаточно сложно. В связи с этим при оптимизации режимов обработки по предложенному способу исходим из конкретных условий структуры рабочего цикла.

Экспериментально была найдена следующая эмпирическая зависимость:

$$\dot{\omega} = \frac{\dot{\psi}}{10^4 K_{\omega}}, \quad (3)$$

где  $\dot{\omega}$  - угловая скорость поворота (доворота) инструмента вокруг оси  $Y$ ;

$\dot{\psi}$  - угловая скорость вращения изделия или инструмента вокруг своей продольной оси  $Z$ ;

$K_{\omega}$  - безразмерный коэффициент перехода, он определен экспериментальным путем.

Здесь безразмерный коэффициент  $K_{\omega}$  находится в функциональной зависимости от следующих факторов: скорости резания, действующей на зубе инструмента нагрузки, ширины зубчатого венца обрабатываемого изделия, режущих свойств абразива зубчатого хона,

$$K_{\omega} = f(V_p, P_H, B, I). \quad (4)$$

Для наших испытаний  $K_{\omega}=15,55$  при скорости резания  $V_p=3$  м/с, нагрузке на зубе инструмента  $P_H=71,5$  Н, ширине зубчатого венца изделия  $B=20$  мм, инструменте, изготовленном из зеленого карбида кремния 630 с зернистостью основной фракции 16.

На рис. 11 показано устройство для осуществления способа пространственной модификации зубьев [9] в разрезе. Оно состоит из инструмента 3, выполненного охватывающим все зубья изделия 2, установленного в стакане 4. Последний смонтирован на валу 5, размещенном в опорах поворотной плиты 7. Поворотная плита установлена на основание 9, привод ее поворота выполнен в виде двигателя, редуктора 12 и кривошипа 11, взаимодействующего с пазом 13 поворотной плиты 7. Ось 17 поворота плиты 7 расположена в плоскости симметрии центрального сечения зубчатого венца обрабатываемого изделия 2. Обрабатываемое изделие 2 закреплено на оправке 1 в шпинделе токарного станка, а само устройство размещено на его продольном суппорте 16.

На торцовом кулачке 10 выполнен профильный паз, с которым взаимодействует ролик 15. Ролик совместно с пазом торцового кулачка 10 образует привод возвратно-поступательного движения инструмента 3, при этом вал 5 имеет возможность, вращаясь, перемещаться вдоль оси вращения в опорах поворотной плиты 7.

Система торможения включает нагрузочный элемент 6, выполненный в виде колодочного тормоза, соединенного с валом 5 при помощи шкивов 8 и клиновых ремней.

Для контроля угла поворота плиты 7 на редукторе 12 установлена шкала 14.

Устройство работает следующим образом.

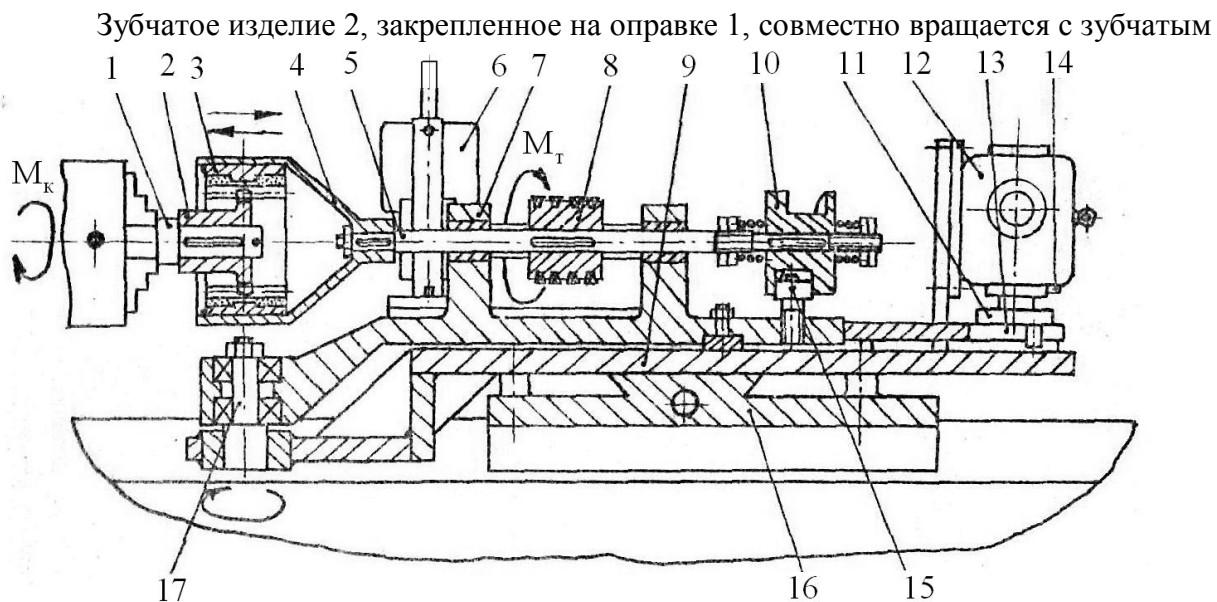
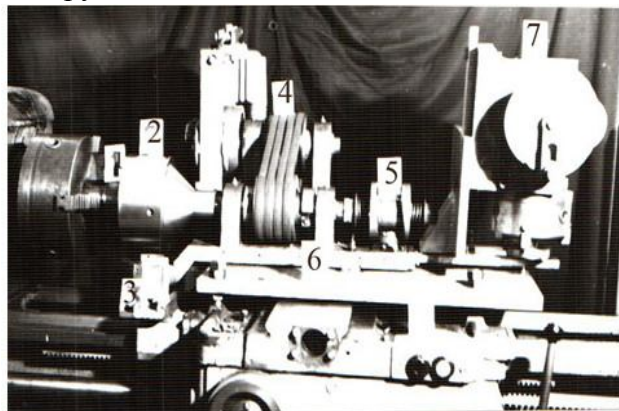
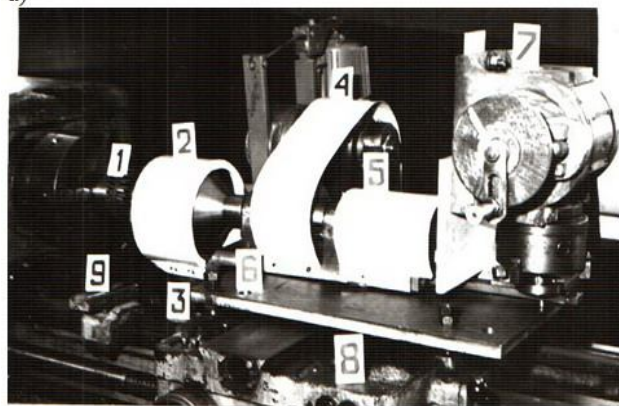


Рис. 11. Устройство для обработки ПМЗМ методом хонингования

инструментом 3, установленным в стакане 4 на валу 5. Обработка ведется за счет того, что инструменту 3 сообщают притормаживание тормозом 6 посредством шкивов 8 и ремней и производят возвратно-поступательные его движения за счет привода 10 и 15. Для получения бочкообразной боковой поверхности зубьев оптимальной формы инструмент 3, находящийся в стакане 4, который установлен на валу 5, поворачивается



а)



б)

Рис. 12. Общий вид устройства для обработки ПМЗМ методом хонингования

вокруг оси 17, расположенной на основании 9. Вал 5 размещен в подшипниках скольжения поворотной плиты 7. Поворот инструмента осуществляется при помощи привода 11, 12 и 13, угол поворота контролируется по шкале 14. Отвод и подвод инструмента при снятии и установке изделия осуществляется при помощи продольного суппорта 16 токарного станка, на котором закреплено все устройство.

На рис. 12,а показан общий вид экспериментального устройства, расположенного на токарно-винторезном станке модели 1К62. Здесь оправка с изделием 1 крепится в его шпинделе. Обрабатываемым инструментом (хоном), установленным в стакане 2, охватываются все зубья изделия. На торцевом кулачке 5 выполнен профильный паз по синусоидальному закону, с которым взаимодействует ролик, для двух циклов возвратно-поступательного движения за один оборот изделия.

Поворотная плита устанавливается на основание 6, привод ее поворота 7 поворачивает ее вокруг оси 3. Основание 6 жестко закреплено болтами на продольном суппорте 8.

При снятии обработанного изделия 1 необходимо отводить суппорт 8 вправо от исходного положения. При подводе суппорта в исходное положение необходимо, чтобы при обработке ось 3 поворота плиты была расположена в плоскости симметрии зубчатого венца обрабатываемого изделия 1. Поэтому подвод суппорта 8 осуществляется по упору 3, закрепленному на продольник направляющих станка, который определяет положение оси 3 относительно венца изделия 1 и предварительно настраивается в нужное положение.

Система торможения 4 включает нагрузочный элемент, выполненный в виде колодочного тормоза типа ТТ-160, шкивов и клиновых ремней. Величина тормозного момента подбирается из расчета действующей нагрузки на зубе инструмента 60,5–71,5 Н/зуб (значения получены экспериментальным путем).

На рис. 12,б показан общий вид устройства для обработки бочкообразных зубьев с рациональной формой боковой поверхности в подготовленной к эксплуатации виде. Кожух 2 предназначен для предотвращения разбрызгивания СОЖ, а кожухи 4 и 5 закрывают вращающиеся части устройства. Подача СОЖ осуществляется по трубопроводу в нижнюю часть инструмента. Остальные позиции рис. 12,б соответствуют позициям рис. 12,а.

При передаче вращения зубчатой втулке (изделию) шпинделем станка с постоянной угловой скоростью  $\dot{\psi}$  угловая скорость поворота инструмента  $\omega$  вокруг оси  $Y$  также должна быть постоянной во всех фазах его поворота с целью обеспечения объема равномерного припуска. В связи с тем, что поворот инструмента осуществляется кулисным механизмом, определим закон изменения угловой скорости привода доворота инструмента исходя из описанного выше условия.

На основании построений рис. 13 угол доворота инструмента  $\omega$  связан с углом поворота кривошипа  $\Omega$  следующей зависимостью:

$$\omega = \arctg \frac{r_{\Omega} \sin \Omega}{l - r_{\Omega} \cos \Omega}, \quad (5)$$

где  $r_{\Omega}$  — радиус эксцентриситета кривошипа;

$l$  — расстояние от оси поворота (дворота) инструмента до оси вращения кривошипа;

$\Omega$  — угол поворота кривошипа.

Используя принятые обозначения, представим скорость доворота инструмента следующей формулой:

$$\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{d\Omega} \frac{d\Omega}{dt}, \quad (6)$$

Тогда

$$\dot{\omega} = \arctg \frac{r_{\Omega} (l \cos \Omega - r_{\Omega})}{l^2 - 2lr_{\Omega} \cos \Omega + r_{\Omega}^2} \frac{d\Omega}{dt}, \quad (7)$$

$$\text{Здесь} \quad \frac{d\Omega}{dt} = \dot{\Omega} = \frac{2\pi n_1}{i}, \quad (8)$$

где  $\dot{\Omega}$  — угловая скорость вращения кривошипа;

$n_1$  — частота вращения привода доворота;

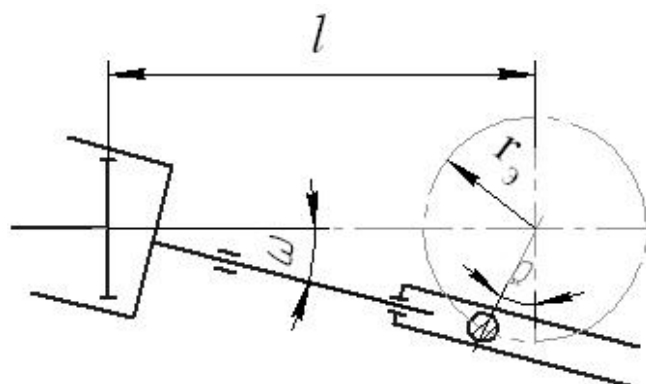


Рис. 13. К определению угла доворота инструмента

$i$  - передаточное отношение редуктора привода доворота.

На основании формул (7) и (8) частота вращения привода доворота определяется следующей формулой

$$n_1 = \frac{\dot{\omega} i (\ell^2 - 2lr_{\text{Э}} \cos \Omega + r_{\text{Э}}^2)}{2\pi r_{\text{Э}} (\ell \cos \Omega - r_{\text{Э}})}. \quad (9)$$

Введем формулу (3) в (9), получим выражение для определения изменения частоты вращения привода доворота инструмента в зависимости от кинематических и геометрических параметров устройства:

$$n_1 = \frac{\dot{\psi} i (\ell^2 - 2lr_{\text{Э}} \cos \Omega + r_{\text{Э}}^2)}{10^4 K_{\omega} r_{\text{Э}} (\ell \cos \Omega - r_{\text{Э}})}. \quad (10)$$

Таким образом, используя формулу (10), можно выполнить постоянную скорость доворота инструмента за счет обеспечения переменной частоты вращения привода доворота. Заметим, что угол поворота кривошипа  $\Omega$  имеет ограничение. Максимальная величина  $\Omega_{\text{max}}$  определяется из формулы (10) путем подстановки в левую часть ее вместо  $n_1$ , максимального значения частоты вращения асинхронного двигателя привода доворота  $n_{\text{max}}$ .

### 3. Заключение

В заключении можно отметить, что выполненные комплексные исследования обеспечили возможность решить ряд задач связанных с разработкой технологического процесса изготовления ПМЗМ. Это позволило следующее:

- разработать общий подход последовательного приближения геометрии рабочей поверхности зубьев к теоретически точной пространственно-модифицированной геометрии, получаемой с использованием второго способа Оливье;
- разработать общую методику и принципы синтеза структуры технологического процесса и обеспечения последовательного приближения геометрии рабочей поверхности зубьев к теоретически точной пространственно-модифицированной геометрии;
- разработать конкретный технологический процесс приближения геометрии рабочей поверхности зубьев к теоретически точной пространственно-модифицированной геометрии;
- разработать способ и устройство изготовления теоретически точной пространственно-модифицированной геометрии зубьев муфт, получаемой с использованием второго способа Оливье.

В целом выполненные исследования и разработанная технология позволяют комплексно решать задачи повышения качества и эффективности изготовления ПМЗМ.

**Список литературы:** 1. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. - М.: Наука, 1968. - 584 с. 2. А.с. 1425374 (СССР) МКИ F16D 3/18. Зубчатая муфта / Михайлов А.Н. – Оpubл. в БИ № 35, 1988. – 5 с. 3. Гитуни А. Синтез новой геометрии зубьев муфт // Материалы седьмого научно-практического семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». – Донецк: ДонНТУ, 2007. С. 624-626. 4. Михайлов А.Н., Гитуни А. Основы синтеза пространственно-модифицированных зубьев муфт // Автоматизация: Проблемы, идеи, решения: Материалы международной научно-техн. конф. 16 – 17 октября 2006 г. – Тула: ТулГУ, 2006. С. 11 – 13. 5. Михайлов А.Н., Гитуни А., Грубка Р.М. Упрочняющая термомеханическая обработка зубьев втулок зубчатых муфт // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. Вип. 33. С. 146-153. 6.

А.с. № 1291312 (СССР) МКИ В23F 9/00. Способ обработки бочкообразных зубьев / Михайлов А.Н., Финиченко В.А., Лукичев А.В., Тернюк Н.Э., Завадский А.И., Тернюк Н.Э. - Оpubл. в БИ. № 7, 1987. – 5 с. 7. А.с. № 1346360 (СССР) МКИ В23F 9/00. Устройство для обработки зубчатых изделий с пространственно модифицированными зубьями / Финиченко В.А., Чернышев Н.А., Лукичев А.В., Михайлов А.Н. - Оpubл. в БИ. № 39, 1987. - 4 с. 8. А.с. № 1348096 (СССР) МКИ В23F 9/00. Устройство для чистовой обработки зубчатых изделий с пространственно модифицированными зубьями / Финиченко В.А., Михайлов А.Н., Лукичев А.В., Колесник Е.Н., Тернюк Н.Э. Завадский А.И., - Оpubл. в БИ. № 40, 1987. - 4 с. 9. А.с. № 1333486 (СССР) МКИ В23F 3/18. Способ обработки зубчатых колес с бочкообразным зубом и устройство для его осуществления / Финиченко В.А., Ажажа В.И., Михайлов А.Н., Завадский А.И., Тернюк Н.Э. - Оpubл. в БИ. № 32, 1987. - 4 с. 10. А.с. № 15110257432 (СССР) МКИ В23F 19/00. Способ отделочной обработки зубчатых элементов муфты с пространственно модифицированными зубьями / Михайлов А.Н., Махмутов Б.М., Свечников Г.А. - Оpubл. в БИ. № 36, 1989. – 7 с. 11. А.с. № 1537432 (СССР) МКИ В23Н 9/12. Устройство и электроэрозионному станку для обработки зубчатых изделий пространственного зацепления / Михайлов А.Н., Михайлова Т.Е. - Оpubл. в БИ. № 3, 1990. – 6 с.

Сдано в редакцию 15.01.08

## **ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

**Михайлов А.Н., Михайлова Е.А., Недашковский А.П.** (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

*In the given work the general approach in creation of function-oriented technologies is resulted and their classification is developed. And also here the basic characteristics and features of function-oriented technologies are presented. It is shown, that process of creation of these technologies is based on group of special principles of orientation of technological influences and properties of products. In work it is offered to make process of creation of function-oriented technologies on levels of depth of technology. Offered technologies provide possibility at manufacturing of products completely them to adapt for features of operation. And also to realise the set, demanded or limiting operational potential of a product in the car.*

### **1. Введение**

В последнее время, в связи со стремительным развитием техносферы непрерывно совершенствуются технологии машиностроения, широко развиваются и обновляются общие подходы создания технологических процессов и технологий, создаются качественно новые технологии, обеспечивающие нетрадиционные свойства изделий [1, 2, 3, 4]. К таким технологиям, технологиям нового класса, относятся и функционально-ориентированные технологии изготовления изделий машиностроения [5, 6, 7, 8].

Основная идея создания функционально-ориентированных технологий базируется на следующих положениях [8]:

1. В технологии машиностроения при составлении технологического процесса принято каждое изделие разбивать на исполнительные поверхности, и технологический процесс проектировать, основываясь на определенной последовательности обеспечения свойств этих исполнительных поверхностей.