

СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЗУБЬЕВ МУФТЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ПЕРЕКОСА ОСЕЙ ВАЛОВ

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

In the given work features of synthesis of structure of technological process of manufacturing of the spatially-modified teeth gear coupler depending on conditions of a warp of axes of connected shaft are considered. Researches of deviations of geometrical parameters of the spatially-modified teeth gear couplers from nominal values are executed. Variants of structures of technological process of manufacturing of teeth gear couplers depending on conditions of a warp of axes of shaft are resulted and recommendations about their compilation are given.

В машиностроении, зубчатые муфты предназначены для компенсации погрешностей осей соединяемых ими валов. Они обычно работают в сложных тяжело нагруженных условиях при высокой частоте вращения [1]. В настоящее время разработано множество различных вариантов геометрии зубьев муфт, которые решают свои функциональные задачи. Наиболее эффективной геометрией рабочих поверхностей зубьев является пространственно-модифицированная геометрия зубьев, обеспечивающая выравнивание нагрузки в зацеплении зубьев и линейный контакт зубьев [2, 3, 4] по углу поворота муфты.

Для изготовления пространственно-модифицированной геометрии зубьев муфты разработано множество способов и методов обработки пространственно-модифицированных зубьев муфты [4, 5, 6, 7]. Эти методы позволяют изготавливать пространственно-модифицированную геометрию зубьев муфты для определенных углов перекоса осей элементов зубчатой муфты. При этом нет общих рекомендаций по проектированию структурных вариантов технологических процессов для общего диапазона перекоса элементов зубчатой муфты. Рациональное структурирование вариантов технологических процессов особенно важно для снижения себестоимости изготовления зубчатых муфт и повышения качества их изготовления.

Целью данной работы является снижение себестоимости изготовления зубчатых муфт с пространственно-модифицированной геометрией зубьев и повышение качества их изготовления за счет синтеза рациональной структуры технологического процесса для заданного предела перекосов осей элементов муфты путем последовательного приближения параметров процессов обработки ко 2-му способу Оливье.

Второй способ Оливье изготовления пространственных зацеплений с линейным касанием поверхностей зубцов основывается на двух условиях [1]:

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.

В соответствии с поставленной целью в работе определены следующие задачи: рассмотреть особенности синтеза структуры технологического процесса изготовления пространственно-модифицированных зубьев муфты в зависимости от условий перекоса осей соединяемых валов; выполнить исследования отклонений геометрических параметров пространственно-модифицированных зубьев муфт от номинальных значений;

разработать варианты структур технологического процесса изготовления зубьев муфты в зависимости от условий перекося осей валов и дать рекомендации по их составлению.

Для выполнения синтеза структуры технологического процесса для изготовления пространственно-модифицированных зубьев муфты в зависимости от условий перекося осей соединяемых валов разработана универсальная структура технологического процесса представленная на рис. 1. Эта структура содержит следующие операции:

1 Предварительная обработка (фрезерование методом копирования со структурой движения модульной дисковой фрезы по специальной линии исходного контура);

2. Черновая обработка (фрезерование методом обкатки со структурой движения модульной червячной фрезы по специальной линии исходного контура);

3. Полуцистовая обработка (фрезерование методом копирования модульной дисковой фрезой или обкаткой модульной червячной фрезой, обработка с обеспечением полной идентичности кинематической структуры, выполнение 2-го условия 2-го способа Оливье);

4. Чистовая обработка (операция протягивания методом обкатки специальной зубчатой протяжкой, обработка с обеспечением полной идентичности геометрии инструмента, выполнение 1-го условия 2-го способа Оливье);

5. Финишная обработка (операция хонингования методом пространственной обкатки с помощью зубчатого хона внутреннего зацепления, выполнение 2-х условий 2-го способа Оливье);

6. Доводочная обработка (операция доводки методом пространственной обкатки с помощью специального инструмента, выполнение 2-х условий 2-го способа Оливье).

С помощью этой общей универсальной структуры технологического процесса можно составлять частные варианты рациональных технологических процессов для определенных пределов углов перекося осей элементов муфты. Так как, например, для малых углов перекося осей элементов муфты не требуются все операции универсального технологического процесса, а только необходимо частичная их реализация. Поэтому здесь, необходимы дополнительные исследования в этом направлении. Для выполнения этих исследований сначала определим значения приращений координат реальных поверхностей по отношению к номинальным.

Пусть в системе координат π_{01} задана номинальная инструментальная поверхность

$$\vec{r}_{01,H} = \vec{r}_{01,H}(u, v). \quad (1)$$

Тогда координаты реальной инструментальной поверхности, с учетом погрешностей, описываемых приращением радиус-вектора $\Delta \vec{r}_{01}$, будет следующее

$$\vec{r}_{01,p} = \vec{r}_{01,H} + \Delta \vec{r}_{01}. \quad (2)$$

Семейство поверхностей зубьев определим уравнением такого вида:

$$\vec{r}_{02,p} = \vec{r}_{02,p}(u, v, \Delta \vec{r}_{01}, \varphi, \psi), \quad (3)$$

где φ и ψ - независимые параметры движения.

При последовательном фиксированном значении параметров φ и ψ , уравнения (3) определяют реальную поверхность инструмента в системе π_{02} . Линия контакта инструмента с поверхностью пространственно-модифицированной геометрии зубьев будет найдена, если определить зависимость между параметрами такого вида:

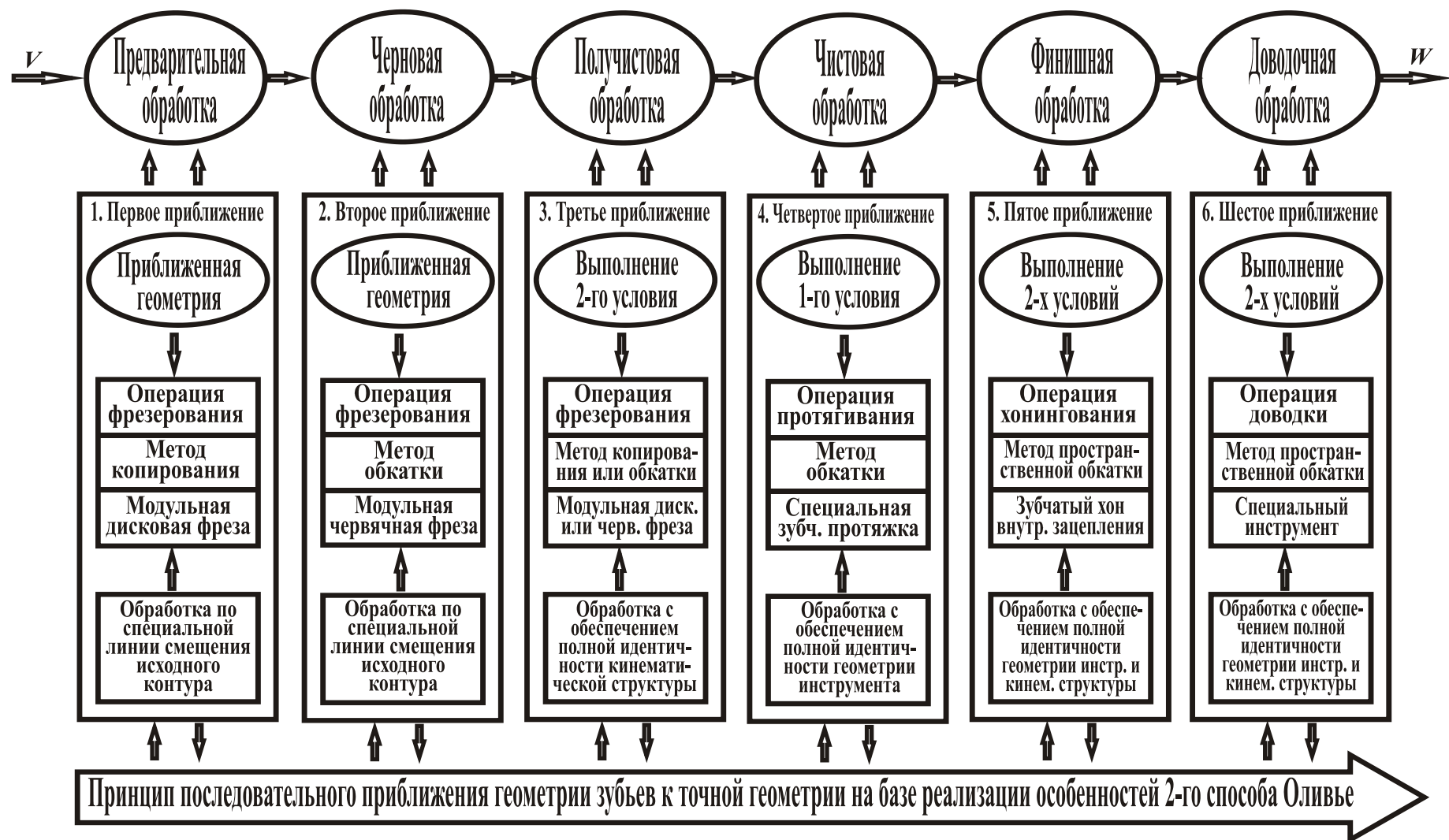


Рис. 1. Схема последовательного приближения геометрии зубьев муфты к точной пространственно-модифицированной геометрии по операциям технологического процесса (общая универсальная структура технологического процесса)

$$u = u(\varphi, \psi); \quad (4)$$

$$v = v(\varphi, \psi). \quad (5)$$

Уравнения (3) и (4), (5) рассмотренные совместно при последовательном фиксированном значении φ или ψ , определяют в системе π_{02} семейство линий контакта взаимоогibaемых поверхностей.

Для определения уравнений (2) и (3), воспользуемся тем, что взаимоогibaемые поверхности имеют общую касательную плоскость. Касательная плоскость к огibaющей поверхности определяется векторами [1]:

$$\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial \varphi}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \psi} + \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial \psi} + \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial \psi}. \quad (7)$$

Касательная плоскость к поверхности зубьев, параметрами которой являются u и v , определяется векторами $\partial \vec{r}_{02,p} / \partial u$ и $\partial \vec{r}_{02,p} / \partial v$. Для того, чтобы векторы находились в касательной плоскости, необходимо, чтобы они были компланарны и смешанное произведение всех векторов было бы равно нулю. Отсюда следует:

$$\left[\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u}, \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v}, \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial \varphi} \right] = 0, \quad (8)$$

$$\left[\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u}, \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v}, \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial \psi} \right] = 0. \quad (9)$$

Из уравнений (8) и (9) находятся искомые зависимости (4) и (5).

Уравнения (8) и (9) можно истолковать следующим образом:

$$\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u} \times \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v} \right) = v_{02}^{(01,02,\varphi)} n_{02} = v_{02}^{(02,01,\varphi)} n_{02} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial \psi} \left(\frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u} \times \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v} \right) = v_{02}^{(01,02,\psi)} n_{02} = v_{02}^{(02,01,\psi)} n_{02} = 0. \quad (11)$$

В этих выражениях $v_{02}^{(01,02,\varphi)}$ и $v_{02}^{(02,01,\varphi)}$ - скорость движения соответственно инструмента относительно пространственно-модифицированной геометрии зубьев и пространственно-модифицированной геометрии зубьев относительно инструмента при фиксированном значении параметра движения ψ . Аналогично $v_{02}^{(01,02,\psi)}$ и $v_{02}^{(02,01,\psi)}$ - соответствующие скорости относительного движения звеньев при фиксированном значении параметра движения φ . Вектор нормали к поверхности пространственно-модифицированной геометрии зубьев в системе π_{02} будет следующий

$$n_{02} = \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial u} \times \frac{\partial \vec{r}_{02,p}}{\partial v}. \quad (12)$$

Уравнения (10) и (11) остаются справедливыми, если векторы нормали и векторы скоростей относительного движения будем рассматривать не в системе π_{02} , а в системе π_{01} , связанной с инструментом, или в системе π_i , связанной с номинальной системой координат зубьев. В этом случае можно записать [1]:

$$n_r v_r^{(01,02,\varphi)} = n_r v_r^{(02,01,\varphi)} = 0; \quad (13)$$

$$n_r v_r^{(01,02,\psi)} = n_r v_r^{(02,01,\psi)} = 0, \quad (14)$$

где $r = 01; 02$.

В ряде случаев, выражения (10) и (11) облегчают определение геометрических параметров реальной поверхности пространственно-модифицированной геометрии зубьев.

В координатной записи уравнение реальной поверхности пространственно-модифицированной геометрии зубьев при $r = 01$ выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} x_{02,p} &= x_{02,p}(u, v, \Delta \vec{r}_{01}, \varphi, \psi); \\ y_{02,p} &= y_{02,p}(u, v, \Delta \vec{r}_{01}, \varphi, \psi); \\ z_{02,p} &= z_{02,p}(u, v, \Delta \vec{r}_{01}, \varphi, \psi); \\ n_{x01} v_{x01}^{(01,02,\varphi)} + n_{y01} v_{y01}^{(01,02,\varphi)} + n_{z01} v_{z01}^{(01,01,\varphi)} &= 0; \\ n_{x01} v_{x01}^{(01,02,\psi)} + n_{y01} v_{y01}^{(01,02,\psi)} + n_{z01} v_{z01}^{(01,01,\psi)} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Выражения $n_{x01}, n_{y01}, n_{z01}$ проекции вектора нормали зависят лишь от вида заданной поверхности инструмента.

Проекции вектора скорости относительного движения звеньев определяются по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} v_{x01}^{(01,02,\varphi)} &= \frac{\partial x_{01,p}}{\partial \varphi}, \\ v_{y01}^{(01,02,\varphi)} &= \frac{\partial y_{01,p}}{\partial \varphi}, \\ v_{z01}^{(01,02,\varphi)} &= \frac{\partial z_{01,p}}{\partial \varphi}, \end{aligned} \right\}, \quad \left. \begin{aligned} v_{x01}^{(01,02,\psi)} &= \frac{\partial x_{01,p}}{\partial \psi}, \\ v_{y01}^{(01,02,\psi)} &= \frac{\partial y_{01,p}}{\partial \psi}, \\ v_{z01}^{(01,02,\psi)} &= \frac{\partial z_{01,p}}{\partial \psi}. \end{aligned} \right\}.$$

Здесь векторы относительной скорости $v_{01}^{(01,02,\varphi)}$ и $v_{01}^{(01,02,\psi)}$ определяются расположением систем координат и параметрами движения и, само собой разумеется, от вида боковой поверхности не зависит.

Из полученных общих уравнений (15) реальных поверхностей пространственно-модифицированной геометрии зубьев вытекают частные случаи уравнений реальных поверхностей всех существующих схем обработки.

Выражение (15) можно представить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} x_{02,p} &= x_{02,p}(\varphi, \psi, \bar{\Delta}_{II}, \bar{\Pi}); \\ y_{02,p} &= y_{02,p}(\varphi, \psi, \bar{\Delta}_{II}, \bar{\Pi}); \\ z_{02,p} &= z_{02,p}(\varphi, \psi, \bar{\Delta}_{II}, \bar{\Pi}), \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где $\bar{\Delta}_{II}$ - вектор приведенных первичных ошибок;

$\bar{\Pi}$ - вектор номинальных геометрических параметров структуры движений.

Используя выражение (16), положив $\bar{\Delta}_H = 0$, можно получить уравнения номинальных поверхностей пространственно-модифицированной геометрии зубьев (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} x_{02,H} &= x_{02,H}(\varphi, \psi, \vec{P}); \\ y_{02,H} &= y_{02,H}(\varphi, \psi, \vec{P}); \\ z_{02,H} &= z_{02,H}(\varphi, \psi, \vec{P}), \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где $x_{02,H}, y_{02,H}, z_{02,H}$ - координаты номинальной поверхности пространственно-модифицированной геометрии зубьев.

Подставив реальные значения геометрических параметров эвольвентных зубьев и кинематики формообразования, уравнения пространственно-модифицированной поверхности зубьев муфты в координатной записи будет следующее [2, 3, 4]:

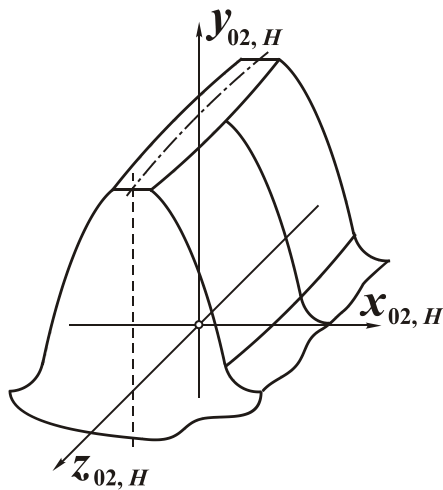


Рис. 2. Номинальная пространственно-модифицированная геометрия зуба муфты

$$\left. \begin{aligned} x_{02,H} &= x_{01,H} + 2A_1 r_b \cos \psi \sin^2 \frac{\omega}{2}, \\ y_{02,H} &= y_{01,H} + 2A_1 r_b \sin \psi \sin^2 \frac{\omega}{2}, \\ z_{02,H} &= A_2 - (x_{01,H} \cos \psi + y_{01,H} \sin \psi) \sin \omega. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Здесь

$$\begin{aligned} A_1 &= \cos(\psi + \varphi - \varphi_c) [\operatorname{ctg}(\psi + \varphi - \varphi_c) + \varphi], \\ A_2 &= \frac{r_b \cos \omega \operatorname{tg} \frac{\omega}{2}}{\sin(\psi + \varphi - \varphi_c)}. \end{aligned}$$

В выражении (18) значения $x_{01,H}$ и $y_{01,H}$ определяются из системы уравнений (19) и являются параметрами эвольвентного профиля зубьев втулки:

$$\left. \begin{aligned} x_{01,H} &= r_b [\sin(\varphi - \varphi_c) - \varphi \cos(\varphi - \varphi_c)], \\ y_{01,H} &= r_b [\cos(\varphi - \varphi_c) + \varphi \sin(\varphi - \varphi_c)], \\ z_{01,H} &= r_b \operatorname{tg} \vartheta. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где r_b - радиус основного цилиндра инструмента;

φ - параметрический угол эвольвенты;

ν - параметрический угол точки в продольном сечении.

Здесь

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

где z - число зубьев;

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

На основе уравнений (17) и (18) вычисляются приращения координат реальных поверхностей пространственно-модифицированной геометрии зубьев по отношению к номинальным поверхностям:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{02,H} &= x_{02,p} - x_{02,H}; \\ \Delta y_{02,H} &= y_{02,p} - y_{02,H}; \\ \Delta z_{02,H} &= z_{02,p} - z_{02,H}, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где $\Delta x_{02,p}$, $\Delta y_{02,p}$, $\Delta z_{02,p}$ - приращения координат реальных поверхностей по отношению к номинальным.

Определив значения параметров приращения координат реальных поверхностей пространственно-модифицированной геометрии зубьев по отношению к номинальным значениям, можно перейти к определению взаимосвязей между этими приращениями и нормируемыми погрешностями пространственно-модифицированной геометрии зубьев, а также к разработке методов снижения погрешностей изготовления пространственно-модифицированной геометрии зубьев.

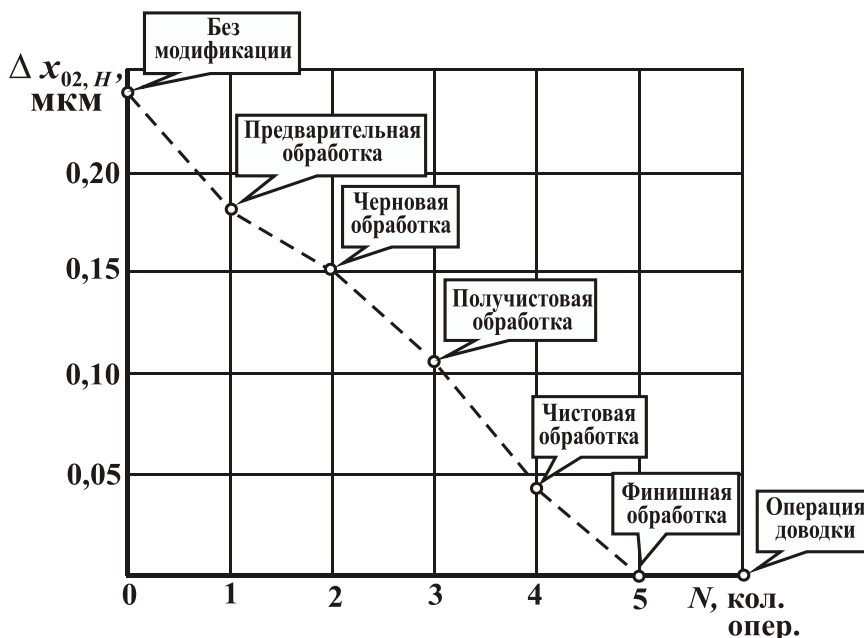


Рис. 3. Зависимость приращения $\Delta x_{02,H}$ координаты реальной $x_{02,p}$ и номинальной $x_{02,H}$ поверхности зуба по операциям N при $z = 22$, $m = 5,5$ мм, $B = 20$ мм, $\omega = 1,5^\circ$

На рис. 3 представлена зависимость приращения $\Delta x_{02,H}$ координаты реальной $x_{02,p}$ и номинальной $x_{02,H}$ поверхности зуба по операциям N при $z = 22$, $m = 5,5$ мм, $\omega = 1,5^\circ$, $B = 20$ мм. Выполнив анализ зависимостей приращения $\Delta x_{02,H}$ координаты реальной $x_{02,p}$ и номинальной $x_{02,H}$ поверхности зуба по операциям N для различных углов перекосов осей элементов муфты можно дать рекомендации по

составлению структуры технологических процессов. Эти рекомендации сведены в таблицу.

В таблице представлены варианты структур технологических процессов для различных значений перекосов осей втулки относительно обоймы.

Таблица 1. Структура технологических процессов в зависимости от перекосов осей

№ п/п	Значения перекосов осей втулки относительно обоймы, град.	Номера технологических операций	Структура технологического процесса
1	$0^{\circ} < \omega \leq 0,25^{\circ}$	5	$\Rightarrow \textcircled{5} \Rightarrow$
2	$0,25^{\circ} < \omega \leq 0,5^{\circ}$	5, 6	$\Rightarrow \textcircled{5} \Rightarrow \textcircled{6} \Rightarrow$
3	$0,5^{\circ} < \omega \leq 0,75^{\circ}$	4, 5, 6	$\Rightarrow \textcircled{4} \Rightarrow \textcircled{5} \Rightarrow \textcircled{6} \Rightarrow$
4	$0,75^{\circ} < \omega \leq 1,0^{\circ}$	3, 4, 5, 6	$\Rightarrow \textcircled{3} \Rightarrow \textcircled{4} \Rightarrow \textcircled{5} \Rightarrow \textcircled{6} \Rightarrow$
5	$1,0^{\circ} < \omega \leq 1,5^{\circ}$	2, 3, 4, 5, 6	$\Rightarrow \textcircled{2} \Rightarrow \textcircled{3} \Rightarrow \textcircled{4} \Rightarrow \textcircled{5} \Rightarrow \textcircled{6} \Rightarrow$
6	$1,5^{\circ} < \omega \leq 2,0^{\circ}$	1, 2, 3, 4, 5, 6	$\Rightarrow \textcircled{1} \Rightarrow \textcircled{2} \Rightarrow \textcircled{3} \Rightarrow \textcircled{4} \Rightarrow \textcircled{5} \Rightarrow \textcircled{6} \Rightarrow$

В заключение можно отметить, что в данной работе рассмотрены особенности синтеза структуры технологического процесса изготовления пространственно-модифицированных зубьев муфты в зависимости от условий перекоса осей соединяемых валов. Выполнены исследования отклонений геометрических параметров пространственно-модифицированных зубьев муфт от номинальных значений и построен конкретный график зависимости приращения координаты реальной и номинальной поверхности пространственно-модифицированной поверхности зуба по операциям. А также разработаны рациональные варианты структур технологического процесса изготовления зубьев муфты в зависимости от условий перекоса осей валов и даны рекомендации по их составлению.

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. – Опубл. 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. 80. Патент Туниса № SN 08289. Outil De Poulissage / Guitouni Ahmed, Mikhaïlov Alexander Nikolaïvitch. 30 Juin 2008. - 8 p. 7. Михайлов А.Н., Гитуни А., Ляхин А.М., Грубка Р.М., Михайлов Д.А. Синтез структуры и технологического обеспечения изготовления пространственно-модифицированных зубьев муфт // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. Вип. 35. С. 136-151.

Сдано в редакцию 17.01.2009