

СТАНОЧНОЕ ЗАЦЕПЛЕНИЕ ГЛОБОИДНОГО ЧЕРВЯКА, ФОРМООБРАЗОВАННОГО ПЛОСКОСТЬЮ

А. Н. Говердовский, Р. З. Ибрагимов, А. Б. Виноградов

Приводится аналитическое исследование влияния наладок станка на расположение характеристик при шлифовании витков червяка плоской стороной абразивного инструмента.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационные показатели большинства современных механизмов и машин для прокладки кабеля зависят от качества и надежности зубчатых передач, применяемых в их приводах. Выбор типа привода, его рациональная компоновка и проектирование в значительной степени определяют возможность получения оптимальных технико-экономических и эксплуатационных характеристик будущих механизмов и машин. К числу наиболее важных показателей, соответствующих требованиям сбережения энергоресурсов, относят металлоемкость и габариты механизмов и машин и их элементов, виброакустическую активность, безотказность и долговечность, точность передачи преобразуемых параметров, возможность широкомасштабного применения способов изготовления, стоимость. Поэтому совершенствование зубчатых передач в машиностроении является одной из важнейших народнохозяйственных задач.

В настоящее время в механизмах и машинах для прокладки кабеля доминирующее положение среди глобоидных зацеплений занимают классическая и модифицированная передачи. Однако они не соответствуют предъявляемым к глобоидным передачам основным требованиям из-за неудовлетворительной геометрии зацепления и технологии изготовления звеньев передач.

Объектом исследования является станочное зацепление глобоидного червяка при формообразовании его поверхности плоскостным инструментом. Червяк обладает большой твердостью и высокой чистотой рабочих поверхностей витков. Первые результаты теоретического и экспериментального исследования показали, что глобоидная передача, образованная с номинальными станочными наладками на базе такого червяка, обладает значительной нагрузочной способностью и повышенными эксплуатационными качествами [1].

2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Формообразование винтовой поверхности глобоидного червяка плоскостью выполняем по схеме рис. 1. В процессе шлифования ось вращения обрабатываемой заготовки параллельна плоскости стола станка; угол β наклона оси шлифовального круга к плоскости стола станка постоянен. Оси вращения инструмента и червяка перекрещиваются, образуя угол $90^\circ \pm \varepsilon_0$. В исследовании станочного зацепления используем три основные декартовы прямоугольные системы координат, приведенные на рис. 2: подвижные системы $S_0(x_0, y_0, z_0)$ и $S_1(x_1, y_1, z_1)$, связанные соответственно с плоскостью шлифовального круга и червяком, и неподвижную систему $S(x, y, z)$, относительно которой задаем положение подвижных систем.

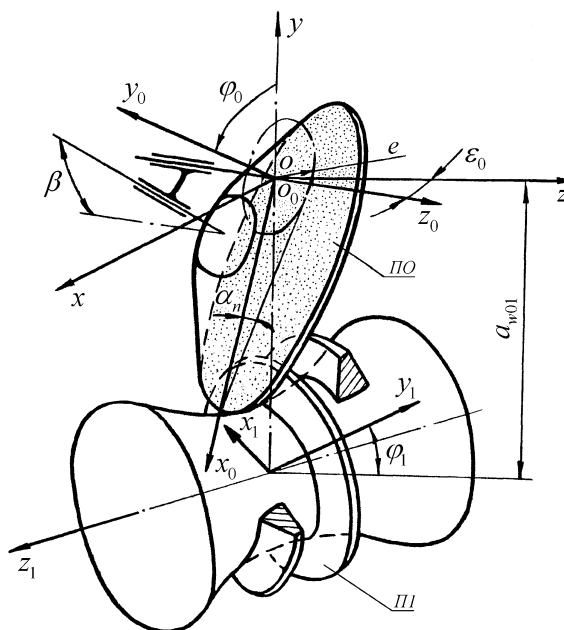


Рис. 1. Схема шлифования витков глобоидного червяка

С помощью этих трёх систем описываем относительное движение звеньев станочного зацепления.

Кроме перечисленных S_0 , S_1 , S , необходимы вспомогательные системы $S_p(x_p, y_p, z_p)$ и

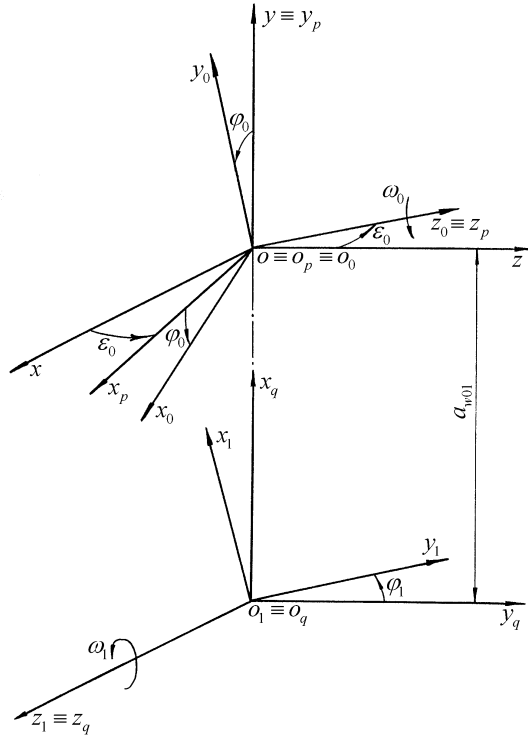


Рис. 2. Координатные системы станочного зацепления

$S'_p(x_p, y_p, z_p)$, используемые при выводе формул преобразования.

Относительное движение S_0 и S_1 характеризуется углом φ_0 поворота плоскости относительно оси z и углом φ_1 вращения червяка вокруг оси z_1 . Эти углы связаны передаточным отношением $u_{10} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\phi_1}{\phi_2} = \text{const}$.

Схема рис. 1 отвечает варианту правого червяка. Если червяк левый, то при том же направлении его вращения изменяется направление вращения инструмента. В соответствии с этим в приводимых ниже зависимостях должны быть изменены на противоположные знаки перед φ_0 или u_{10} .

Воспользуемся матричной формой перехода из одной системы координат в другую:

$$\begin{aligned}\bar{r}_S &= M_{Sp} M_{p0} \bar{r}_0 = M_{S0} \bar{r}_0, \\ \bar{r}_0 &= M_{S0}^{-1} \bar{r}_S, \\ \bar{r}_S &= M_{Sq} M_{q1} \bar{r}_1 = M_{S1} \bar{r}_1, \\ \bar{r}_1 &= M_{S1}^{-1} \bar{r}_S, \\ \bar{r}_0 &= M_{0S} M_{S1} \bar{r}_1 = M_{01} \bar{r}_1, \\ \bar{r}_1 &= M_{01}^{-1} \bar{r}_0.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь

$$r_S = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad r_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad r_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{pmatrix} -$$

столбцовые матрицы радиусов-векторов текущей точки соответственно в системах координат S , S_0 и S_1 .

Каждая сторона витка червяка шлифуется отдельно. Пусть положение производящей поверхности-плоскости П0, иллюстрированное рис. 3, отвечает формообразованию левой стороны витка П1, а П0' – правой. Плоскость повернута относительно системы S'_0 на профильный угол α_n (см. рис. 3, а) и угол наклона β (см. рис. 3, б).

Переписывая в систему S_0 с помощью формул преобразования

$$\begin{pmatrix} x'_0 \\ y'_0 \\ z'_0 \\ t'_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ t_0 \end{pmatrix}$$

получаем

$$-x_0 \operatorname{tg} \alpha_t + y_0 + z_0 \operatorname{tg} \beta + \frac{e}{\cos \alpha_n \cos \beta} = 0, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg} \alpha_t = \frac{\operatorname{tg} \alpha_n}{\cos \beta}$ – угол наклона П0 в торцевом сечении.

Взаимодействие сопряжённых поверхностей П0 и П1 формализуется относительным движением звеньев 0 и 1, а относительное движение – преобразованием декартовых координат.

Согласно (1) элемент переносного движения точки

$$d\bar{r}_0 = \frac{\partial M_{01}}{\partial \phi_0} \cdot \bar{r}_1 \cdot d\phi_0.$$

При этом на основании обратного преобразования (2)

$$d\bar{r}_0 = \frac{\partial M_{01}}{\partial \phi_0} \cdot M_{01}^{-1} \cdot \bar{r}_0 \cdot d\phi_0. \quad (4)$$

В развёрнутом виде зависимость (4) имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} dx_0 &= - \left[y_0 (1 + u_{10} \sin \varepsilon_0) + z_0 \cos \varepsilon_0 \sin \phi_0 + a_{w01} u_{10} \sin \varepsilon_0 \cos \phi_0 \right] d\phi_0, \\ dy_0 &= \left[x_0 (1 + u_{10} \sin \varepsilon_0) + z_0 u_{10} \cos \varepsilon_0 \cos \phi_0 - a_{w01} u_{10} \sin \varepsilon_0 \sin \phi_0 \right] d\phi_0, \\ dz_0 &= u_{10} \cos \varepsilon_0 \left(x_0 \sin \phi_0 - y_0 \cos \phi_0 - a_{w01} \right) d\phi_0. \end{aligned} \right\}$$

Взаимное огибание поверхностей П0 и П1 характеризуется уравнением зацепления

$$\bar{N}_{П0} \cdot d\bar{r}_0 = \left(\frac{\partial M_{01}}{\partial \phi_0} \cdot M_{01}^{-1} \cdot \bar{r}_0 \right) = 0,$$

где согласно (3) $\bar{N}_{П0} \{-\operatorname{tg} \alpha_t, 1, \operatorname{tg} \beta\}$ – нормаль П0.

Умножая и опуская промежуточные преобразования, представим в виде

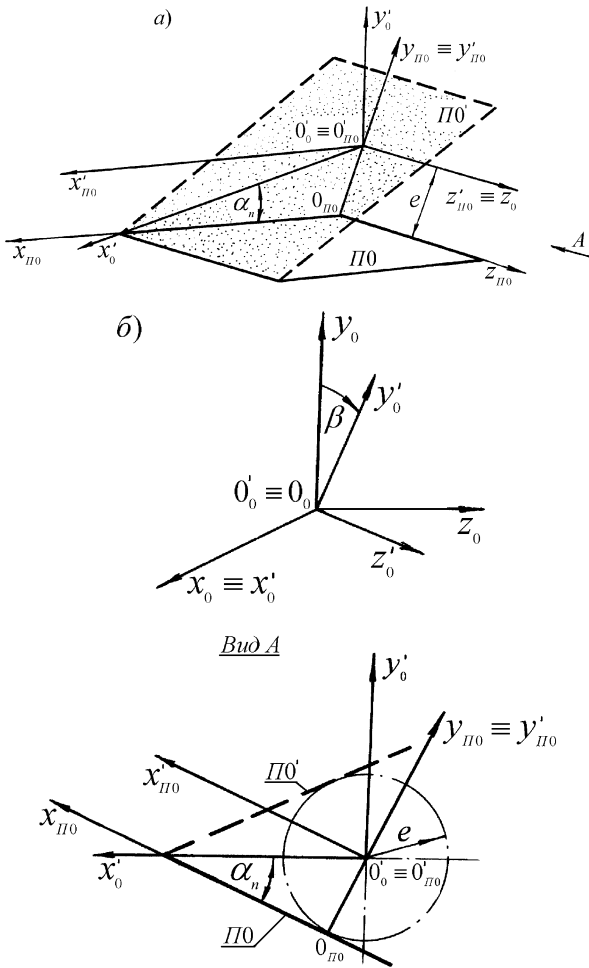


Рис. 3. Положение производящей плоскости

$$\begin{aligned}
 & x_0 (1 + u_{10} \sin \varepsilon_0 + u_{10} \cos \varepsilon_0 \operatorname{tg} \beta \sin \phi_0) + \\
 & y_0 \left[(1 + u_{10} \sin \varepsilon_0) \operatorname{tg} \alpha_t - u_{10} \cos \varepsilon_0 \operatorname{tg} \beta \cos \phi_0 \right] + \\
 & + z_0 u_{10} \cos \varepsilon_0 \frac{\cos(\phi_0 - \alpha_t)}{\cos \alpha_t} - \\
 & a_{w01} u_{10} \left[\sin \varepsilon_0 \frac{\sin(\phi_0 - \alpha_t)}{\cos \alpha_t} + \operatorname{tg} \beta \cos \varepsilon_0 \right] = 0.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Объединяя выражения (3) и (5), имеем уравнение контактной линии на производящей плоскости. Для определения координат точек линии контакта решаем полученное уравнение относительно x_0, z_0 :

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{(y_0 + b_1)b_2 - \operatorname{tg} \beta (y_0 b_3 - b_4)}{b_2 \operatorname{tg} \alpha_t + b_5 \operatorname{tg} \beta}, \\ z_0 &= \frac{(y_0 + b_1)b_5 + \operatorname{tg} \alpha_t (y_0 b_3 - b_4)}{b_2 \operatorname{tg} \alpha_t + b_5 \operatorname{tg} \beta} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $b_1 = \frac{e}{\cos \alpha_n \cos \beta}$;

$$b_2 = u_{10} \cos \varepsilon_0 \frac{\cos(\phi_0 - \alpha_t)}{\cos \alpha_t};$$

$$b_3 = 1 + u_{10} \sin \varepsilon_0 + u_{10} \operatorname{tg} \beta \cos \varepsilon_0 \sin \phi_0;$$

$$b_4 = (1 + u_{10} \sin \varepsilon_0) \operatorname{tg} \alpha_t - u_{10} \operatorname{tg} \beta \cos \varepsilon_0 \cos \phi_0;$$

$$b_5 = a_{w01} u_{10} \left[\sin \varepsilon_0 \frac{\sin(\phi_0 - \alpha_t)}{\cos \alpha_t} + \operatorname{tg} \beta \cos \varepsilon_0 \right].$$

Расчёт координат точек контактной линии выполняют при фиксированном угле ϕ_0 , задавая рядом значений координаты y_0 . Целесообразным является задание y_0 в интервале, соответствующем полю зацепления. Координаты x_0 и z_0 в уравнениях (6) линейно зависят от параметра y_0 . Следовательно, линия контакта является отрезком прямой.

С целью анализа влияния наладок станка a_{w01} , u_{10} , α_n , ε_0 , β на условие зацепления по формулам (6) произведён расчёт координат точек контактных линий на производящей плоскости Π_0 при шлифовании червяков глобоидных передач по ГОСТ 9369 – 77 (табл. 1).

Таблица 1. Параметры исследуемых передач

Межосевое расстояние a_w	Число заходов червяка z_1	Число зубьев колеса z_2	Передаточное число $u = \frac{z_2}{z_1}$
160	1	50	$\frac{50}{1}$
	2	50	$\frac{50}{2}$
	3	37	$\frac{37}{3}$

На рис. 4 – 15 показаны проекции контактных линий на плоскость $x_0 O_0 z_0$, перпендикулярную оси вращения червяка. Угол обката ϕ_0 принимался в пределах от $75^\circ 36'$ до $104^\circ 24'$ с шагом, равным угловому шагу зубьев колеса. Такое задание ϕ_0 позволяет проследить за движением и расположением контакта в поле зацепления.

Из рис. 4 – 15 видно, что изменение параметров β , ε_0 , a_{w01} , α_n приводит к трансформации станочного поля зацепления: его перемещение вправо или влево от линии кратчайшего межосевого расстояния, его расширению или сужению.

Расположение контактных линий в большой степени зависит от величины угла β и ε_0 , определяющих взаимное расположение шлифуемого червяка и инструмента. Линия от начала зацепления ($\phi_0 = 104^\circ 24'$) быстро перемещается по Π_0 ; по мере приближения к выходу из зацепления ($\phi_0 = 75^\circ 36'$) скорость движения контакта падает, а в вариантах рис. 12, 13, 15 доходит до нуля в отдельных точках и изменяет свое направление на выходе из зацепления.

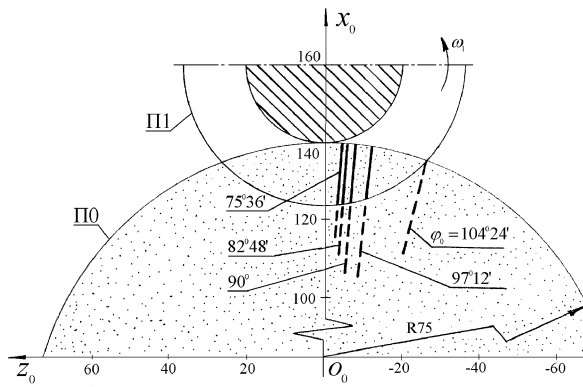


Рис. 4. Характеристики зацепления: $a_{w01} = 160$ мм,

$$u_{10} = u_{12} = \frac{50}{1}, \quad \beta = \varepsilon_0 = 0^\circ, \quad \alpha_n = 20^\circ, \quad e = 50 \text{ мм}$$

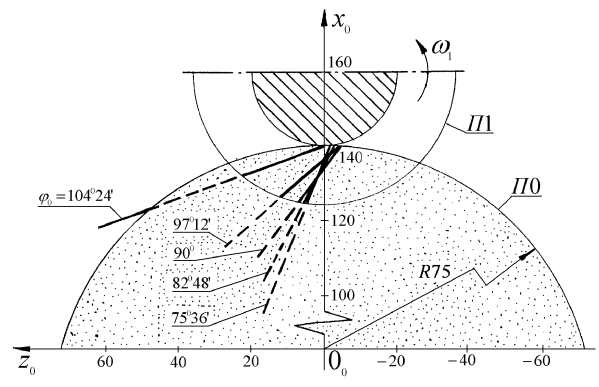


Рис. 7. Характеристики зацепления: $a_{w01} = 160$ мм,

$$u_{10} = u_{12} = \frac{50}{1}, \quad \beta = 12^\circ 24', \quad \varepsilon_0 = 0^\circ, \quad \alpha_n = 20^\circ, \quad e = 50 \text{ мм}$$

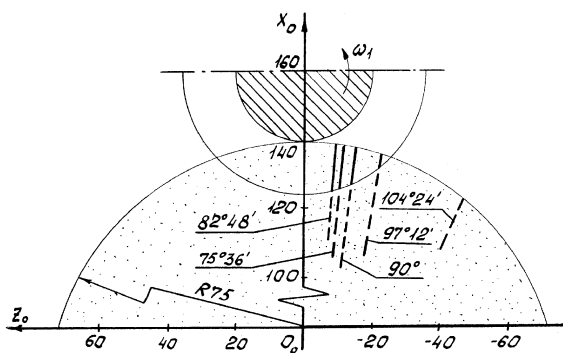


Рис. 5. Характеристики зацепления: $a_{w01} = 160$ мм,

$$u_{10} = u_{12} = \frac{50}{2}, \quad \beta = \varepsilon_0 = 0^\circ, \quad \alpha_n = 20^\circ, \quad e = 50 \text{ мм}$$

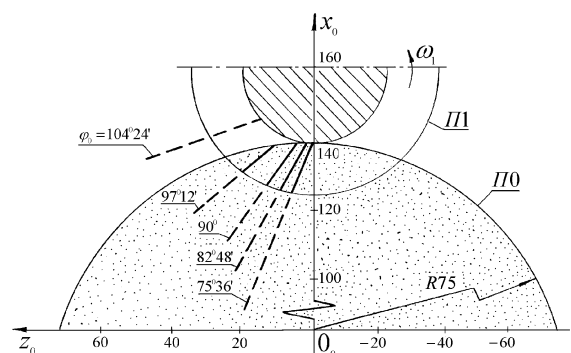


Рис. 8. Характеристики зацепления: $a_{w01} = 160$ мм,

$$u_{10} = u_{12} = \frac{50}{1}, \quad \beta = \varepsilon_0 = 6^\circ 19', \quad \alpha_n = 20^\circ, \quad e = 50 \text{ мм}$$

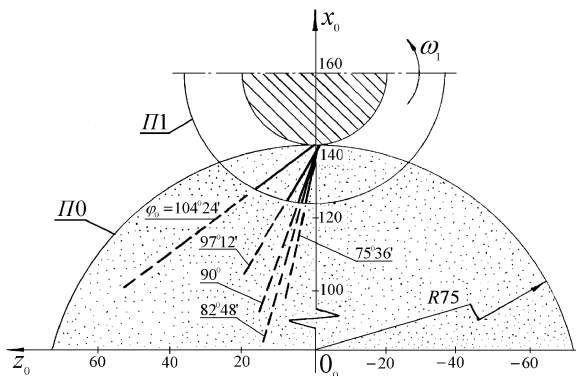


Рис. 6. Характеристики зацепления: $a_{w01} = 160$ мм,

$$u_{10} = u_{12} = \frac{50}{1}, \quad \beta = 6^\circ 19', \quad \varepsilon_0 = 0^\circ, \quad \alpha_n = 20^\circ, \quad e = 50 \text{ мм}$$

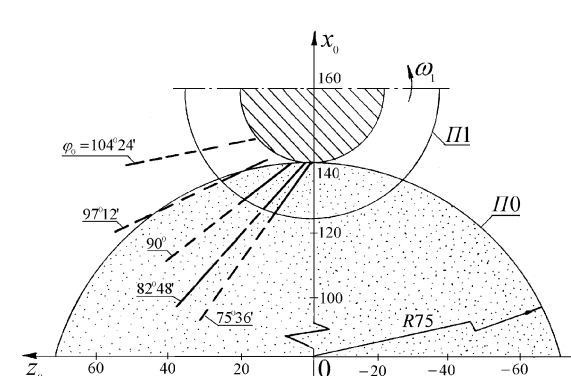
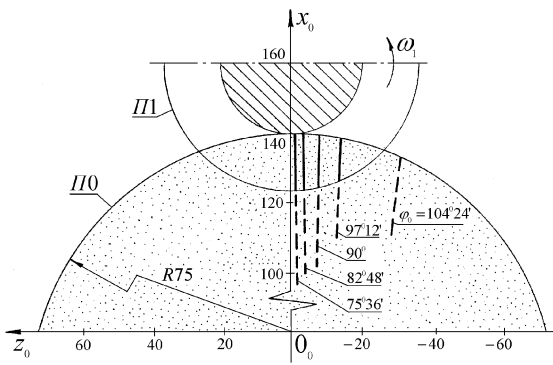


Рис. 9. Характеристики зацепления: $a_{w01} = 160$ мм,

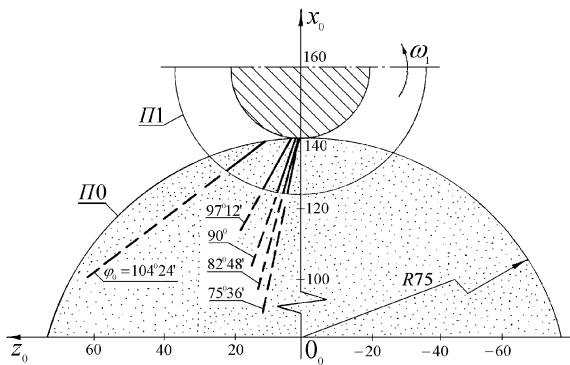
$$u_{10} = u_{12} = \frac{50}{2}, \quad \beta = 12^\circ 24', \quad \varepsilon_0 = 9^\circ, \quad \alpha_n = 20^\circ, \quad e = 50 \text{ мм}$$

Таким образом, на П0 обнаруживается участок поверхности, подвергающийся действию контакта дважды, что повлечет к дополнительному повышению температуры в передаче. Этот недостаток устраняется подбором соответствующих станочных наладок. Так, в вариантах рис. 4, 5, 8 – 11, 14 наблюдается рассредоточенность и одностороннее движение контакта с более равномерной скоростью перемещения.

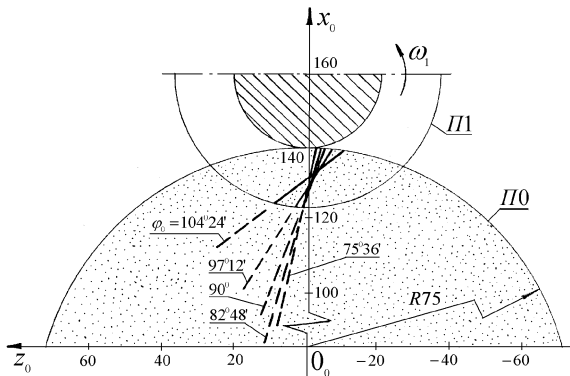
Увеличение межосевого расстояния a_{w01} по сравнению с межосевым расстоянием a_w глобоидной передачи расширяет зону контакта (см. рис. 11), а при уменьшении a_{w01} – сжимает (см. рис. 12), а также уменьшает значение ν – угла между направлением относительной скорости и контактной линией.

Рис. 10. Характеристики зацепления: $a_{w01} = 160$ мм,

$$u_{10} = u_{12} = \frac{50}{1}, \quad \beta = 6^\circ 19', \quad \varepsilon_0 = -6^\circ 19', \quad \alpha_n = 20^\circ, \quad e = 50 \text{ мм}$$

Рис. 11. Характеристики зацепления: $a_{w01} = 170$ мм,

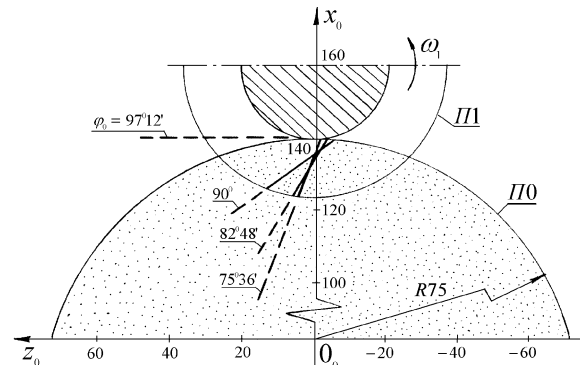
$$u_{10} = u_{12} = \frac{50}{1}, \quad \beta = 6^\circ 19', \quad \varepsilon_0 = 0^\circ, \quad \alpha_n = 20^\circ, \quad e = 50 \text{ мм}$$

Рис. 12. Характеристики зацепления: $a_{w01} = 159$ мм,

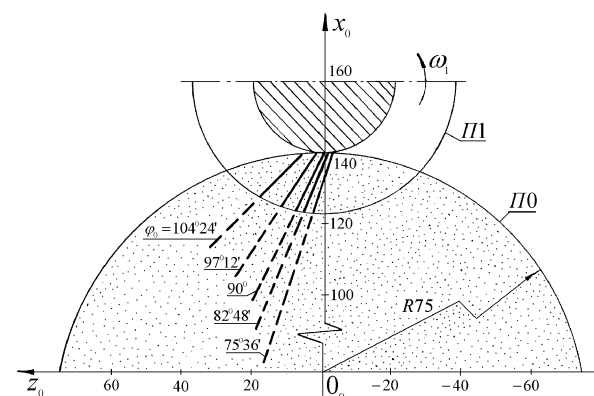
$$u_{10} = u_{12} = \frac{50}{1}, \quad \beta = 6^\circ 19', \quad \varepsilon_0 = 0^\circ, \quad \alpha_n = 20^\circ, \quad e = 50 \text{ мм}$$

Изменение u_{10} по отношению u_{12} не оказывает существенного влияния на расположение контактных линий.

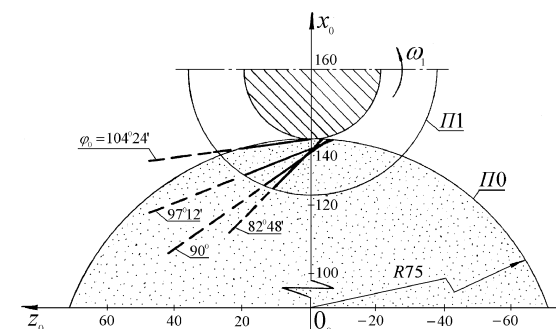
Увеличение профильного угла червяка больше 20° (рис. 14) ведет к улучшению условий контакта на инструменте в процессе шлифования. Однако оптимальным интервалом может быть $25^\circ \leq \alpha_n \leq 30^\circ$, так как выбор $\alpha_n > 30^\circ$ приводит к заострению зубьев колеса нормальной высоты.

Рис. 13. Характеристики зацепления: $a_{w01} = 160$ мм,

$$u_{10} = u_{12} = \frac{50}{1}, \quad \beta = \varepsilon_0 = 0^\circ, \quad \alpha_n = 20^\circ, \quad e = 47,414 \text{ мм}$$

Рис. 14. Характеристики зацепления: $a_{w01} = 160$ мм,

$$u_{10} = u_{12} = \frac{50}{1}, \quad \beta = \varepsilon_0 = 6^\circ 19', \quad \alpha_n = 30^\circ, \quad e = 50 \text{ мм}$$

Рис. 15. Характеристики зацепления: $a_{w01} = 160$ мм,

$$u_{10} = u_{12} = \frac{37}{3}, \quad \beta = 24^\circ 14' 30'', \quad \varepsilon_0 = 0^\circ, \quad \alpha_n = 20^\circ, \quad e = 50 \text{ мм}$$

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Станочные наладки позволяют управлять расположением и направлением контактных линий при шлифованиях. Наложив то или иное требование к полю зацепления и контакта, можно с помощью приведенного метода заранее получать данные о наладках. Такими требованиями могут быть: благоприятное кинематическое расположение контактных линий для

заклинивания смазки, условие полной прошлифовываемости витка по его высоте, снижение приведённой кривизны контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов А. Б. Исследование глобоидной передачи с червяком, шлифуемым плоскостью / А. Б. Виноградов, В. А. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1984. – № 11. – С. 30–34.

Говердовский Андрей Николаевич:

студент группы В-37 СибГУТИ, (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86) тел. (383) 269-82-53,
e-mail: gluks@ngs.ru.

Ибрагимов Роман Захирович:

студент группы М-35 СибГУТИ, (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86) тел. (383) 269-82-53,
e-mail: drimm@yandex.ru.

Виноградов Алексей Борисович:

д.т.н., профессор кафедры линии связи СибГУТИ,
(630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86)
тел. (383) 269-82-53, e-mail: abvinogradov@yandex.ru.