

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.91

*Е. Ю. Демиденко, А. А. Жолобов, В. А. Лапицкий*

### ВЛИЯНИЕ СМЕЩЕНИЯ ОСИ ЦЕНТРОВ ШЛИЦЕФРЕЗЕРНОГО СТАНКА НА ТОЧНОСТЬ ФОРМИРУЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

UDC 621.91

*E. Y. Demidenko, A. A. Zholobov, V. A. Lapitsky*

### IMPACT ON PRECISION OF MACHINED SURFACES DUE TO OFFSET OF THE AXIS OF CENTERS IN A SPLINE-AND-KEYWAY MILLER

#### Аннотация

В статье математически описана связь погрешности смещения оси центров станка с точностью шлицевой поверхности, получаемой на этапах предварительной (токарной), формообразующей (шлицефрезерной) и окончательной обработки на шлицешлифовальном станке. Представлены зависимости для определения прогнозируемых погрешностей детали, связанные с состоянием базовых элементов технологической системы.

#### Ключевые слова:

ось центров станка, смещение оси шлицевый вал, шлицефрезерование, моделирование, погрешность профиля, эвольвентный шлицевый профиль.

#### Abstract

The paper describes mathematically the relationship of the offset error of the axis of centers in a spline-and-keyway miller with the accuracy of a splined surface obtained at the stages of pre-machining (turning), forming (spline-milling) and finishing machining. The dependences are presented for determining predicted errors of the part related to the condition of the basic elements of the technological system.

#### Key words:

axis of machine centers, axis offset, splined shaft, spline milling, modeling, profile error, involute spline profile.

Известно, что при формировании поверхностей деталей на станках с базированием заготовок по центровым гнёздам особое влияние на точность обработки оказывает геометрическая точность технологического оборудования, в том числе и взаимное расположение его центров, а также смещение центровых гнёзд на самой заготовке [1].

В машиностроении особую важность приобретает качественная обра-

ботка деталей со сложными фасонными поверхностями, например, фрезерование эвольвентных шлицев червячной фрезой.

Эвольвентные шлицевые соединения, как и прямоочные, предназначены для передачи крутящего момента между ступицей и валом и одновременного обеспечения точности центрирования, высокой нагрузочной способности при ограниченных габаритах соединения.

В тяжело нагруженных механизмах эвольвентные шлицевые соединения вытесняют прямобочные. Это объясняется их повышенной прочностью, технологичностью, точностью центрирования, самоустановкой под нагрузкой, а также возможностью лёгкого перемещения шлицевой втулки вдоль оси вала или вала вдоль оси втулки.

Эвольвентные шлицевые соединения обладают высокой конструкторской привлекательностью. Однако в настоящее время в производственных условиях возникает задача обеспечения точности их изготовления.

Исследователи и производители отечественной и зарубежной машиностроительной продукции все большее внимание уделяют использованию таких систем графического и компьютерного моделирования процессов формирования поверхностей деталей [2–4] для создания наиболее полного пакета конструкторской, технологической и информационной документации, которые

позволяют повысить уровень достоверности систем прогнозирования поведения технологических объектов и снизить затраты на опытное производство и потери от брака.

Установка заготовки на шлицефрезерном станке осуществляется в центрах передней и задней бабок. При рассмотрении общего случая нахождения действительной оси центров станка (рис. 1) можно выделить две пересекающиеся и не совпадающие в пространстве плоскости (плоскость  $A$  и плоскость  $B$ ), имеющие одну общую прямую – теоретическую ось центров.

Точки пересечения теоретической оси центров станка с плоскостью торцов заготовки можно обозначить через точки  $O_1$  и  $O_2$  (см. рис. 1). Смещение базовой оси приводит к возникновению точек пересечения действительной оси с торцами заготовки  $O_{12}$  и  $O_{22}$ , смещённых относительно теоретических на расстояние  $c_1$  и  $c_2$  соответственно.

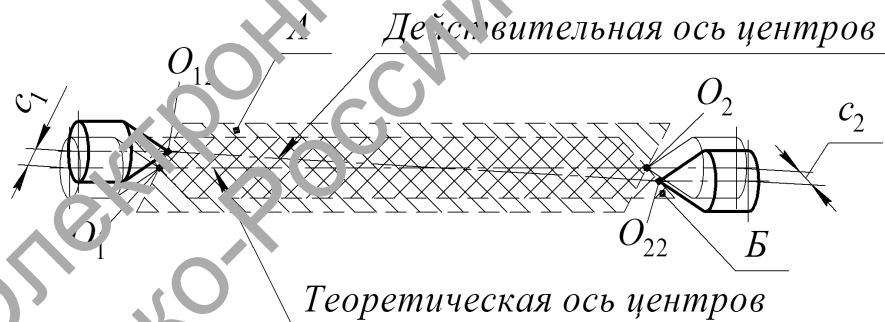


Рис. 1. Схема расположения теоретической и действительной осей центров

Принята для расчёта погрешностей эвольвентного шлицевого профиля декартова прямоугольная система координат, относящаяся к заготовке, представлена на рис. 2. Такое же расположение координатных осей распространяется и на технологическую систему резания, в том числе и на режущий инструмент (фреза червячная, резец токарный, круг шлифовальный).

Максимального значения смеще-

ние оси центров будет достигать в плоскости торцов или же по всей длине заготовки (параллельное смещение). Однако детали класса «валы» со шлицевыми поверхностями зачастую имеют шлицы не по всей своей длине, а на отдельном участке. Поэтому целесообразно произвести расчёт погрешностей шлицевого профиля, вызванных смещением центров станка, в произвольном сечении по длине заготовки.

В представленной системе координат это смещение определено через

координаты  $a_1, b_1$  для левого центра и  $a_2, b_2$  для правого центра (рис. 3).

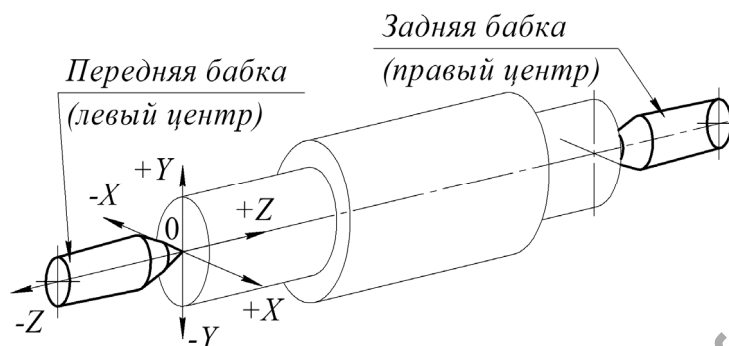


Рис. 2. Принятая в расчётах система координат

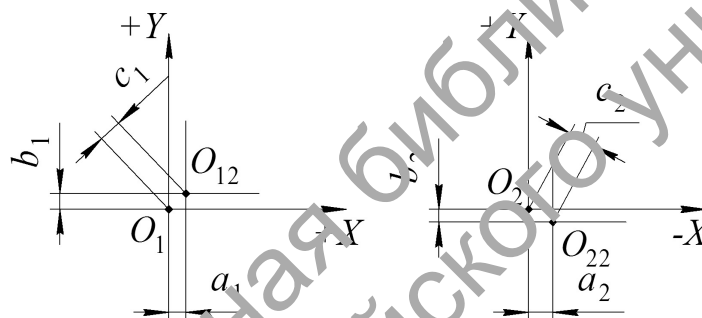


Рис. 3. Точки пересечения действительной и теоретической осей центров с плоскостями торцов заготовки

При условии, что погрешности базовых поверхностей (центровых отверстий) заготовки отсутствуют ось вращения заготовки совпадет с действитель-

ной осью центров станка и заготовка сместится относительно базовой системы координат и примет положение, представленное на рис. 4.

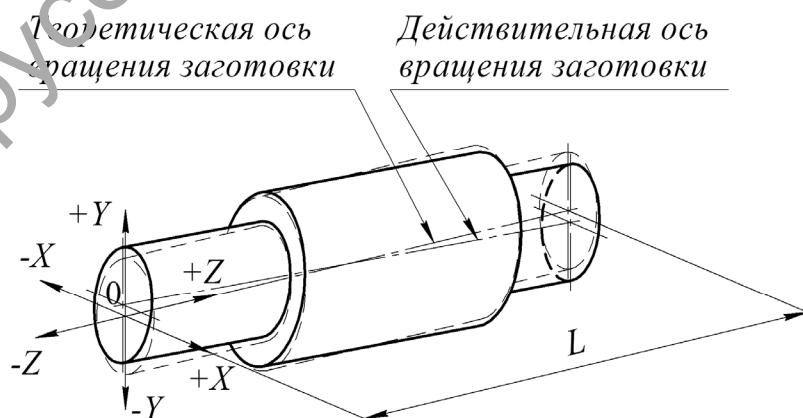


Рис. 4. Пространственное расположение заготовки на станке

Для расчёта смещения оси вращения заготовки в конкретном сечении на расстоянии  $L_0$  от левого торца (рис. 5) следует рассмотреть проекцию харак-

терных точек (следов) пересечения теоретической и действительной осей с торцами заготовки на плоскость  $XOY$  (рис. 6).

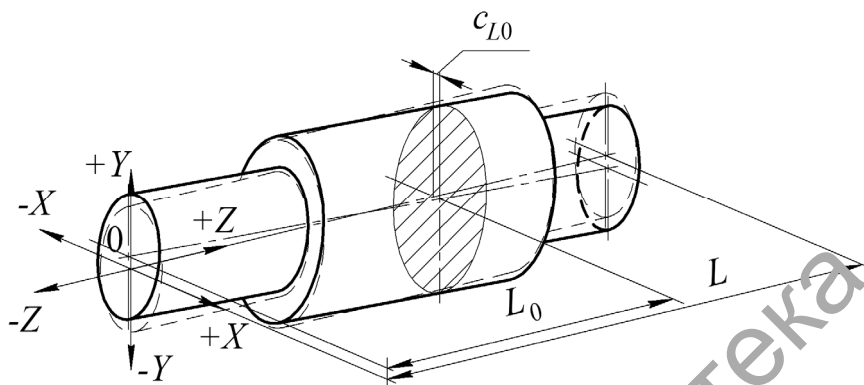


Рис. 5. Смещение оси вращения заготовки в произвольном сечении

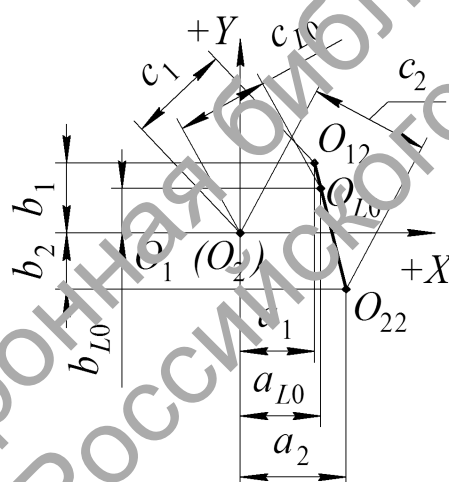


Рис. 6. Проекция точек (следов) на плоскость  $XOY$

Для нахождения координат точки  $O_{L0}$ , лежащей на действительной оси детали на расстоянии  $L_0$  от левого торца, составлена система параметрических уравнений прямой в пространстве:

$$\begin{cases} a_{L0} = a_1 + (a_2 - a_1) \cdot t; \\ b_{L0} = b_1 + (b_2 - b_1) \cdot t; \\ z_{L0} = z_1 + (z_2 - z_1) \cdot t, \end{cases} \quad (1)$$

где  $a_{L0}$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  – координаты точек смещения на оси  $X$ ;  $b_{L0}$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – координаты точек смещения на оси  $Y$ ;  $z_{L0}$ ,  $z_1$ ,  $z_2$  – координаты точек смещения на оси  $Z$

(на проекции не показаны);  $t$  – параметр системы уравнений.

В зависимости от величины смещения каждого из центров станка можно выделить пять случаев:

- 1)  $c_2 > c_1$ ;
- 2)  $c_1 < c_2$ ;
- 3)  $c_2 > c_1$  и  $c_1 = 0$ ;
- 4)  $c_1 < c_2$  и  $c_2 = 0$ ;
- 5)  $c_1 = c_2$  и  $c_1 \neq 0$  и  $c_2 \neq 0$ .

Следует отметить, что для рассмотрения принимаются процессы формообразования в условиях абсолютной жёсткости элементов технологической

системы: детали, инструментальной оправки и т. д.

В первом случае (рис. 7) в процессе фрезерования шлицевого профиля червячная фреза настроена на обработку шлицев, по высоте ограниченных диаметром окружности впадин. Однако при наличии погрешности расположения оси центров станка, как показано

на рис. 7, профиль впадины вала в продольном сечении примет форму конуса, ось которого совпадёт с действительной осью вращения заготовки. Величина конусности продольного профиля тем больше, чем больше расстояние между величинами  $c_1$  и  $c_2$ , измеренное на проекции (см. рис. 6).

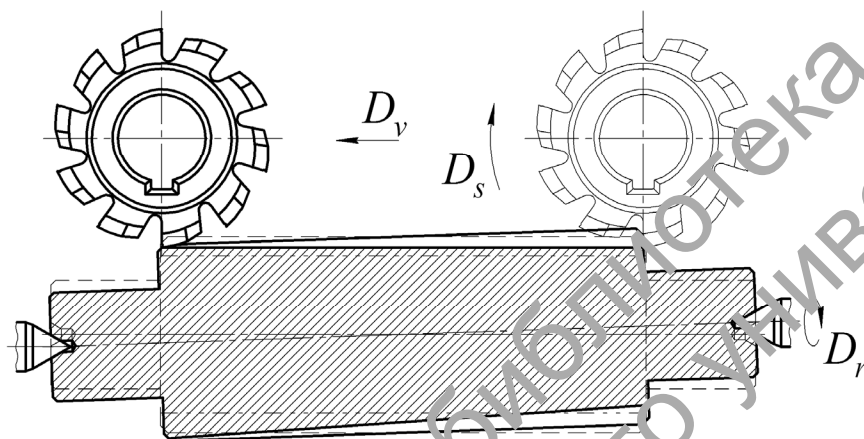


Рис. 7. Образование конусности продольного профиля

Для рассматриваемого случая смещения центров высота шлицев в начале обработки будет больше и может превысить заданную стандартом. Причиной возникновения разности высот шлицев, обрабатываемых с погрешностью центров станка и без погрешности, является настройка режущего инструмента — червячной фрезы — на обработку шлицевого профиля с заданным диаметром впадин. В начале обработки, когда ось заготовки смещена «к фрезе», инструментом будет срезаться больший слой металла по высоте, чем этого требует чертёж, но не превышающий рабочую высоту зуба фрезы. В процессе перемещения фрезы к шпиндельному узлу высота шлицев будет уменьшаться и в частном случае может быть равна нулю.

Во втором случае (рис. 8), когда ось центров станка смещена «к фрезе» у шпиндельного узла и в направлении от режущего инструмента у задней бабки,

профиль впадины шлицевого профиля заготовки в продольном сечении примет форму конуса вдоль некоторой части детали со стороны заднего центра. На участке, когда высота шлица обрабатываемой на станке заготовки будет становиться больше рабочей высоты зуба фрезы в результате упругого отжатия заготовки от инструмента, червячная фреза будет формировать на заготовке шлицевые впадины, по глубине превышающие заданные чертежом, но не больше рабочей высоты зуба фрезы.

Последние три случая являются частными, и анализ для них не производится.

Согласно установленным требованиям ГОСТ 6033-80 *Основные нормы взаимозаменяемости. Соединения шлицевые эвольвентные с углом профиля 30 град. Размеры, допуски и измеряемые величины* [5] радиальный зазор между дном впадины вала и вершиной шлица

отверстия в шлицевом соединении при плоском дне впадины вала не должен быть меньше значения минимального зазора:

$$2c_{\min} = D_a - d_f = (D - 2m) - (D - 2,2m) = 0,2m, \quad (2)$$

где  $D_a$  – диаметр окружности вершин шлицев отверстия, мм;  $d_f$  – диаметр окружности впадин шлицев вала, мм;  $D$  – номинальный диаметр соединения, мм;  $m$  – модуль эвольвентного шлицевого соединения, мм;

$$c_{\min} = 0,1m.$$

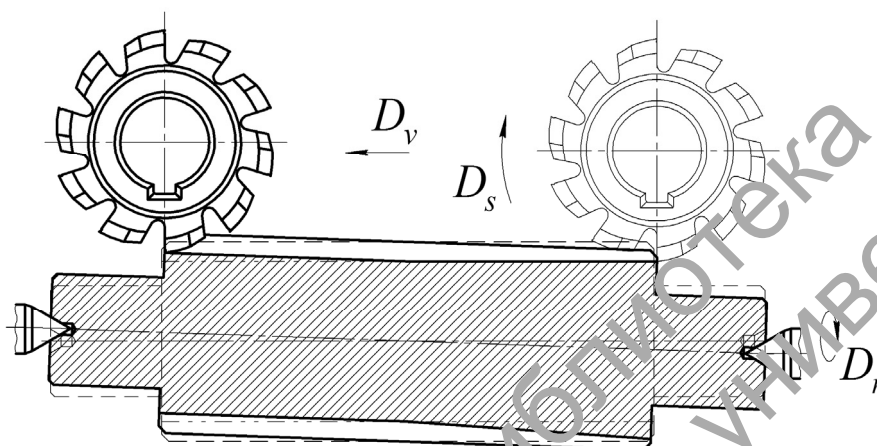


Рис. 8. Образование погрешности продольного профиля

При обработке универсальным инструментом значение диаметра окружности впадин вала уменьшается по сравнению с номинальным значением на величину  $0,1 \cdot m$  (при обработке червячной фрезой). Следовательно, величину  $c_{\min}$  необходимо пересчитать по формуле

$$2c_{\min} = D_a - d_f = (D - 2m) - (D - 2,2m - 0,1m) = 0,3m; \quad (3)$$

$$c_{\min} = 0,15m.$$

Предельное значение зазора  $c_{\min}$  при закругленной форме дна впадины вала также регламентировано

ГОСТ 6033-80. Расчетная формула аналогична формуле (3) с принятым уменьшением значения диаметра  $d_f$  согласно ГОСТ 6033-80:

$$2c_{\min} = D_a - d_f = (D - 2m) - (D - 2,76m - 0,1m) = 0,86m; \quad (4)$$

$$c_{\min} = 0,43m.$$

ГОСТ 6033-80 устанавливает пятнадцать значений модулей для шлицевых соединений эвольвентного профиля от 0,5 до 10 мм. Как показано ранее, радиальный зазор  $c$  напрямую зависит от модуля  $m$  (табл. 1).

Табл. 1. Предельные значения регламентируемых параметров соединения

Модуль, мм	0,5	0,8	1,25	2	3	3,5	4	5	6	8
Радиальный зазор при плоской форме дна впадины, мм	0,075	0,12	0,188	0,3	0,45	0,525	0,6	0,75	0,9	1,2
Радиальный зазор при закругленной форме дна впадины, мм	0,215	0,344	0,538	0,86	1,29	1,505	1,72	2,15	2,58	3,44

Из табл. 1 видно, что для модуля соединения 0,5 мм диапазон изменения радиального зазора лежит в пределах от 75 до 215 мкм и равен 140 мкм, для модуля 3 мм этот диапазон иной и равен 840 мкм, а для 5 мм – 1400 мкм.

С целью определения диаметра

впадин  $d_{f.d.}$  действительного эвольвентного шлицевого профиля заготовки в каждом сечении с учётом прецессии её оси вращения рассматривается схема взаимного расположения заготовки относительно режущего инструмента – червячной фрезы (рис. 9).

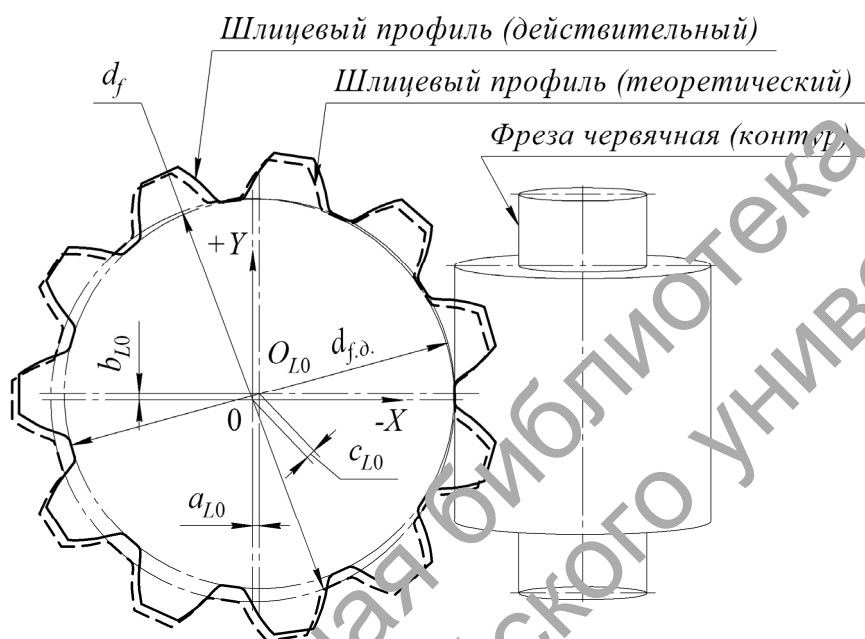


Рис. 9. Схема взаимного расположения заготовки относительно фрезы

По модели процесса формирования профиля эвольвентных цилиндр зубьями червячной фрезы на основе схемы взаимного расположения заготовки относительно инструмента в процессе обработки можно определить действительную величину диаметра впадин детали по формуле

$$d_{f.d.} = d_f \pm 2a_{L0}. \quad (5)$$

Знак в формуле зависит от координаты  $a_{L0}$  вдоль оси X.

На примере моделирования обработки шлицевого профиля с параметрами по ГОСТ 6033-80 (модуль соединения  $m = 3$  мм, количество шлицев  $z = 32$ , номинальный диаметр соединения  $D = 100$  мм, окружная ширина шлица вала на делительной окружности  $s = 5,117$  мм) можно построить компью-

терную графическую модель влияния прецессии оси вращения заготовки шлицевого вала как на значение диаметра впадин, так и на окружную ширину шлицев. На рис. 10 показано моделирование формообразования шлицевой поверхности без погрешности оси центров.

На рис. 11 изображён профиль шлицевого вала с теми же параметрами, но в модель внесена величина смещения центров станка. В данном сечении смещение, выраженное величинами  $a_{L0} = 0,212$  мм,  $b_{L0} = 0,212$  мм, повлияло на значение диаметра впадин, определяемое по формуле (5):

$$\begin{aligned} d_{f.d.} &= d_f - 2 \cdot 0,212 = \\ &= 93,4 - 0,424 = 93,824 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Величина  $b_{L0}$  не влияет на изме-

нение диаметра  $d_f$  обрабатываемых червячным инструментом шлицевых поверхностей. Влияние смещения вдоль оси  $X$  линейное, для некоторых данных оно показано в табл. 2. Предельная минимальная величина диаметра окружности впадин при центрировании по

наружному диаметру или боковым поверхностям не устанавливается, в то время как максимальное его значение регламентировано в стандарте и влияет на минимальный радиальный зазор.

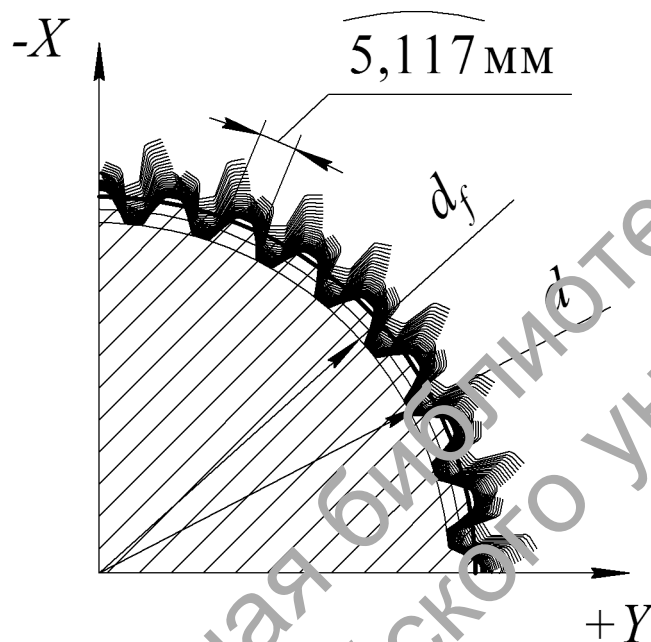


Рис. 10. Схема образования шлицевого профиля при помощи разработанной модели

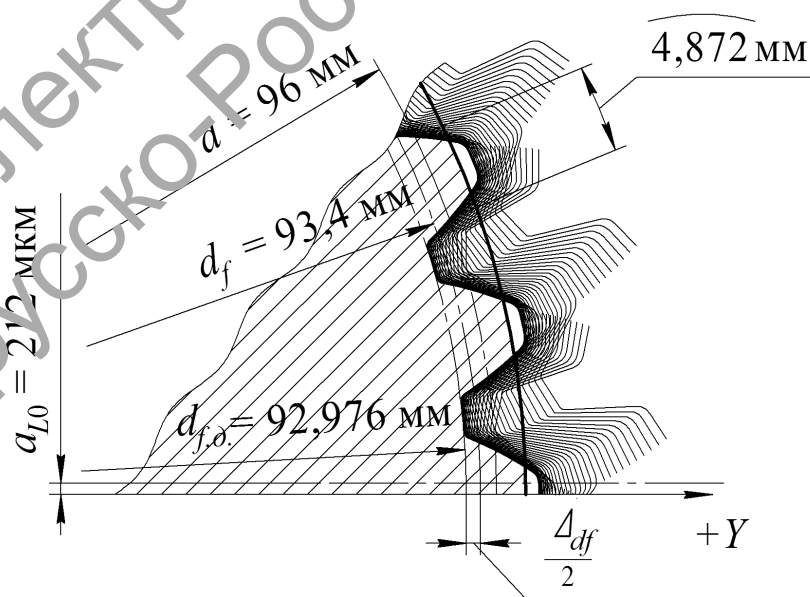


Рис. 11. Моделирование формообразования шлицевого профиля с учётом погрешности оси центров станка



Табл. 2. Погрешность диаметра впадин в зависимости от величины смещения центров станка для  $m = 3$  мм

Смещение вдоль оси $X a_{L0}$ , мкм	0	-71	-141	-212	-283	-354	-424	-495
Действительный диаметр окружности впадин $d_{f0}$ , мм	93,4	93,258	93,118	92,976	92,834	92,692	92,552	92,410
Погрешность диаметра окружности впадин $\Delta_{df}$ , мкм	0	142	282	424	566	708	848	990

Смещение центров станка влияет не только на величину диаметра впадин, но и на толщину шлицев в нормальном сечении. Стандартное значение окружной толщины шлицев  $s$  на делительном

диаметре для  $m = 3$  мм равно 5,117 мм (см. рис. 10).

Влияние прецессии оси центров металлорежущего станка на величину  $s$  имеет линейный характер (табл. 3).

Табл. 3. Погрешность толщины шлица на делительной окружности для  $m = 3$  мм

Смещение вдоль оси $X a_{L0}$ , мкм	0	-71	-141	-212	-283	-354	-424	-495
Смещение вдоль оси $Y b_{L0}$ , мкм	0	-71	-141	-212	-283	-354	-424	-495
Окружная толщина шлица $s$ , мм	5,117	5,035	4,954	4,872	4,790	4,708	4,627	4,545
Погрешность окружной толщины шлица $\Delta_s$ , мкм	0	82	163	245	327	409	490	572

Значение окружной толщины  $s$ , измеренное на делительной окружности с учётом смещения оси центров станка при  $a_{L0} = 212$  мкм,  $b_{L0} = 212$  мкм, равно 4,872 мм, что на 245 мкм меньше стандартного (см. рис. 11).

Сравнивая две таблицы (см. табл. 2 и 3), следует отметить, что смещение базовых поверхностей станка вдоль осей  $X$  и  $Y$  на представленном диапазоне имеет большее влияние на величину  $df$ , чем на  $s$ . Так, перепад погрешности  $\Delta_{df}$  равен 990 мкм, а для величины  $\Delta_s$  – 572 мкм.

На основании анализа определены характер и величины погрешностей, возникающих при изготовлении гладких

и ступенчатых шлицевых валов на шлицезерных станках, центра которых смещены относительно базового положения.

Разработанные графические компьютерные модели процесса червячного фрезерования шлицевых сложных поверхностей и принципы их реализации способствуют проектированию технологических процессов, целью которых является эффективное использование возможностей технологического оборудования и трудовых ресурсов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жолобов, А. А.** Прогнозирование и обеспечение качества технологических систем на этапах их проектирования и изготовления : монография / А. А. Жолобов. – Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 304 с.
2. **Браилов, И. Г.** Моделирование зубофрезерования цилиндрических зубчатых колес / И. Г. Браилов, С. П. Андросов // Изв. Самар. науч. центра РАН. – 2009. – № 5 (2). – С. 260–262.

3. **Шалыжин, К. А.** Моделирование процесса шлицефрезерования червячной фрезой / К. А. Шалыжин, А. А. Жолобов // Информационные технологии, энергетика и экономика : сб. тр. V межрег. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Смоленск : МЭИ, 2008. – С. 141–145.
4. **Tapoglou, N.** Hob3D : A novel gear hobbing simulation software / N. Tapoglou, A. Antoniadis // Proceedings of the World Congress on Engineering. – London : U. K., 2011. – Vol. 1. – P. 861–864.
5. **ГОСТ 6033-80.** Основные нормы взаимозаменяемости. Соединения шлицевые эвольвентные с углом профиля 30 град. Размеры, допуски и измеряемые величины. – М. : Изд-во стандартов, 1993. – 82 с. : ил.

Статья сдана в редакцию 26 сентября 2016 года

**Егор Юрьевич Демиденко**, аспирант, Белорусско-Российский университет. E-mail: igryck@mail.ru.  
**Александр Алексеевич Жолобов**, канд. техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.  
Тел.: +375-222-23-04-51.  
**Владимир Александрович Лапицкий**, ассистент, Белорусско-Российский университет.

**Egor Yuryevich Demidenko**, PhD student, Belarusian-Russian University. E-mail: igryck@mail.ru.  
**Aleksandr Alekseyevich Zholobov**, PhD (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.  
Phone: +375-222-23-04-51.  
**Vladimir Aleksandrovich Lapitsky**, assistant lecturer, Belarusian-Russian University.