

Особенности кинематического анализа циклоидальных схем обработки некруглых профилей

© В.М. Скиба

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Выполнен анализ особенностей формообразования некруглых профилей, описанных циклоидальными кривыми и их эквидистантами. Проведены исследования для схемы обработки многогранной детали эксцентричной круглой фрезой. Применен метод получения многогранного профиля обкаткой образующих окружностей, связанных с заготовкой и фрезой. Исследование параметров схемы и относительных траекторий движения реза выполнено с использованием единой математической формы выражения циклоидальных траекторий в виде параметрических уравнений. Показано влияние на форму грани параметров станка, инструмента и отношения угловых скоростей абсолютных движений. Для иллюстрации определены параметры схемы обработки эксцентричной фрезой, обеспечивающие прямолинейность граней изделия. При исследовании формы изделия рассмотрены траектории центра фрезы. Выявлено влияние изменения сечения срезаемого слоя и кинематических углов резания на закономерности изменения силовых параметров процесса обработки. С помощью современных информационных технологий построены схемы срезания припуска. Приведены особенности прохождения отдельных относительных траекторий вершин фрезы через припуск. Даны рекомендации по применению результатов исследования.

Ключевые слова: кинематический анализ, формообразование, некруглый профиль, циклоидальная схема обработки, углы резания, схема срезания припуска, кинематическая погрешность.

Прогресс в механической обработке происходит путем расширения области применения известных прогрессивных технологических методов, разработки новых технологических процессов, повышения степени автоматизации оборудования, а также путем применения станков, обеспечивающих концентрацию обработки, повышение ее точности, интенсификацию режимов резания благодаря внедрению новых инструментов и т. п. Для поиска и прогнозирования новых методов, способов и средств обработки рекомендуется использовать системный подход [1].

Для реализации некоторых направлений могут быть применены циклоидальные схемы обработки (ЦСО), в которых используются относительные циклоидальные траектории режущих кромок инструмента [2]. В основе ЦСО лежит сочетание двух вращательных или вращательного и поступательного движений, которые сообщают заготовке и инструменту либо только заготовке или инструменту.

В технической литературе широко освещены такие способы обработки некруглых профилей, как точение, фрезерование, долбление

и шлифование с использованием двух вращательных движений. В некоторых публикациях рассмотрены особенности получения и применения некруглых профилей в целях соединения двух деталей. В работе [3] дан обзор методов обработки некруглых поверхностей, образующих такие соединения. В работе [4] приведены результаты экспериментальных исследований формообразования таких профилей высокоскоростным торцевым фрезерованием на станках с ЧПУ в целях обеспечения точности формы, заданной шероховатости и экономической эффективности в сравнении с аналогичными процессами. Применение в машиностроении этих соединений ограничивается нерешенными задачами технологии их изготовления и оценки точности.

На базе классифицированных конструктивно-кинематических ЦСО в работе [2] выполнен анализ особенностей формообразования некруглых профилей, описанных циклоидальными кривыми и их эквидистантами. Приведено условие получения требуемого числа граней профиля, установлено максимально возможное число режущих элементов, обеспечивающих получение соответствующего многогранного цилиндрического профиля, и показано влияние на форму грани параметров технологической системы.

В работе [5] приведена классификация схем фрезоточения некруглых профилей, основными признаками которой являются вид касания детали и фрезы, виды главных движений, их направления, соотношения угловых скоростей и диаметров детали и инструмента, число зубьев фрезы. Схемы фрезоточения исследованы с помощью метода графического моделирования путем определения траекторий относительного движения режущих элементов и анализа профиля детали в поперечном сечении. Для выбора рационального способа фрезоточения некруглых профилей с продольной подачей в работе [6] представлена методика расчета основных параметров процесса.

Расширение области применения ЦСО для получения специфических поверхностей, например дискретно-щелевых структур [7, 8], потребовало проведения теоретических исследований кинематики процесса формообразования, особенно траекторий относительного движения. Для моделирования процесса обработки вращающимся многолезвийным инструментом применен векторный анализ. Предложенная математическая модель рекомендуется для схем с внешним, внутренним и охватывающим касанием инструмента и заготовки.

Для фрезоточения характерны преимущества многолезвийной обработки: кинематическое распределение припуска между режущими элементами, кратковременность резания, увеличение суммарной длины режущих кромок, изменение сечения срезаемого слоя, повышенная суммарная стойкость инструмента, интенсификация обработки.

Анализ закономерностей образования геометрических погрешностей при фрезеровании плоскости, вогнутой и выпуклой поверхно-

стей цилиндрической фрезой со встречной и попутной подачей выполнен в работе [9], при этом подчеркнута связь погрешности с формой относительной траектории движения режущего элемента.

Большое количество публикаций по данной теме свидетельствует о целесообразности дальнейших научно-технических исследований.

Целью данной работы являются обоснование выбора и разработка основных элементов технологических систем на базе ЦСО некруглых профилей.

Существенной особенностью применения ЦСО является тесная связь параметров станка, инструмента и технологического процесса. Результаты исследований необходимы для разработки технологического процесса с учетом кинематики резания и выбора конструктивных параметров станка и инструментов, а также режимов резания. Кинематический анализ обычно является начальным этапом проектирования технологического процесса на основе ЦСО и включает исследования относительных траекторий движения режущих кромок инструмента, пути резания, схемы срезания припуска, изменения углов резания, толщины срезаемого слоя и ширины среза, а также исследование кинематической погрешности обработки.

Движения режущих кромок инструмента относительно заготовки создают поверхности резания, участки которых образуют обработанную поверхность детали, поэтому форма детали определяется относительным движением и геометрическими параметрами режущих кромок инструмента [2]. Отдельные точки режущих кромок описывают относительные траектории, на рабочих участках которых, проходящих через припуск, происходит срезание стружки. Обычно при изучении процесса формообразования сначала рассматривают его идеальную модель, в которой движения абсолютно точные, а сопутствующие явления (деформации, износ и др.) отсутствуют.

Для ЦСО характерны периодичность резания, переменная толщина среза, изменение (трансформация) углов резания, наличие кинематической погрешности и др., т. е. существует большое число факторов, которые определяют особенности обработки и технические характеристики оборудования. Для снижения трудоемкости их анализа целесообразно выявить общие закономерности, связи и применить соответствующий метод исследований. Поскольку предметом исследований обычно являются относительные траектории, характер и вид движения инструмента по ним, то наибольшую ценность представляет расчетный метод с помощью параметрических уравнений в силу его высокой точности и универсальности, а также возможности автоматизации построения относительных траекторий с помощью современных программных средств ПЭВМ. В работе использован автоматизированный метод построения относительных циклоидальных траекторий с помощью программы Mathcad.

Дальнейшие исследования проведены для схемы обработки некруглых профилей эксцентричной круглой фрезой (рис. 1) [2].

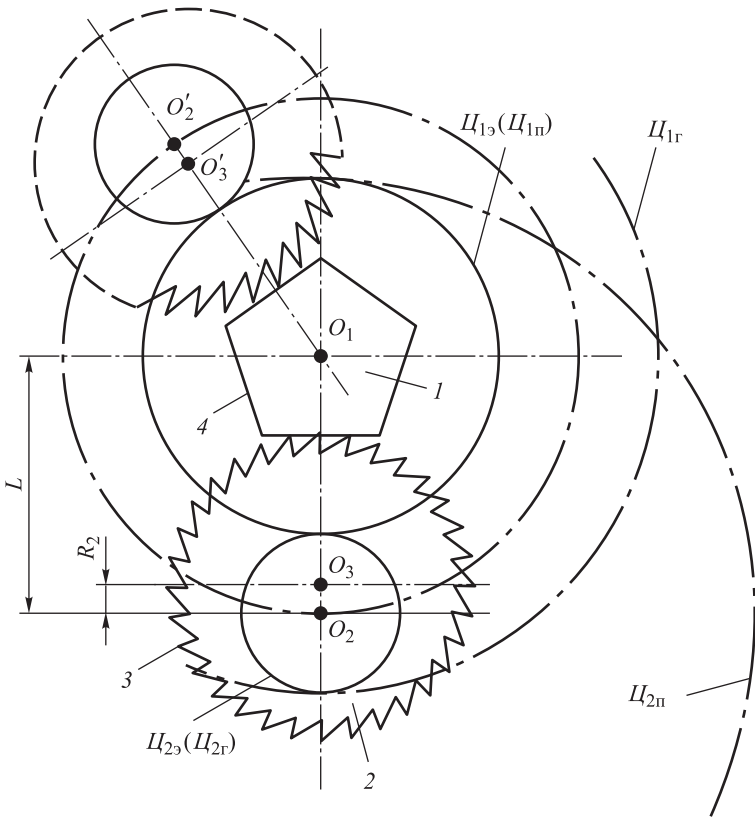


Рис. 1. Схема обработки многогранника эксцентричной фрезой

Возможны различные варианты реализации указанной схемы [10]. Для этого применен известный метод получения циклоидальных кривых с помощью обкатки образующих окружностей (так называемых центроид). Изделие 1 с осью O_1 расположено на расстоянии L от оси O_2 образующей окружности ζ_2 . Ось O_3 круглой фрезы 2 устанавливают на расстоянии R_2 от оси O_2 . Образующей окружности ζ_2 сообщают вращение относительно оси O_2 с угловой скоростью ω_2 . Вращение согласовано с перемещением оси O_2 с угловой скоростью ω_1 за счет обкатывания окружности ζ_2 по основной окружности ζ_1 , ось которой совпадает с осью O_1 изделия 1. Результирующее движение оси O_3 фрезы 2 и ее зубьев 3 относительно оси O_1 изделия 1 происходит по циклоидальным траекториям. При внешнем касании окружностей $\zeta_{1в}$ и $\zeta_{2в}$ траектории оси O_3 и зубьев 3 становятся эциклоидами, при внут-

реннем касании окружностей $\mathcal{C}_{1г}$ и $\mathcal{C}_{2г}$ — *гипоциклоидами*, при касании окружностей $\mathcal{C}_{1п}$ и $\mathcal{C}_{2п}$ — *перициклоидами*.

При внешнем касании образующих окружностей \mathcal{C}_2 и \mathcal{C}_1 отношение угловых скоростей считается отрицательным, а при внутреннем — положительным, т. е. передаточное отношение (кинематический параметр) $i = \omega_2/\omega_1$ для эпициклоиды отрицательное, для перициклоиды $i < 1$, а для гипоциклоиды $i > 1$.

Для получения грани 4 на изделии 1 используют участок ветви циклоидальной траектории оси O_3 фрезы 2. Выбирают такой участок ветви этой траектории, эквидистанта к которому наиболее близка к требуемому профилю грани. При этом формообразование грани осуществляется несколькими зубьями 3 фрезы 2, рабочие участки циклоидальных траекторий которых периодически касаются грани 4 изделия 1. Касание происходит на расстоянии R_ϕ , равном радиусу фрезы 2, от рабочего участка циклоидальной траектории оси O_3 фрезы 2.

Исследование относительных траекторий выполнено с использованием единой математической формы выражения циклоидальных траекторий в виде параметрических уравнений [2]:

$$\begin{aligned} x &= L \cos \varphi + R_2 \cos((1-i)\varphi), \\ y &= L \sin \varphi + R_2 \sin((1-i)\varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y — координаты траектории в системе координат с началом в центре детали O_1 ; L — расстояние между осями круговых движений O_1 и O_2 , параметр станка; R_2 — радиус круговой траектории оси O_3 инструмента; $i = \omega_2/\omega_1$ — кинематический параметр, отношение угловых скоростей вращательных движений (для одинакового направления угловых скоростей $i > 0$, для противоположного — $i < 0$); φ — текущий параметр, угол.

Вид относительной траектории и количество граней определяется значением кинематического параметра i , что соответствует представлению циклоидальных кривых в виде результата обкатывания образующих окружностей.

Обозначим: R_1 — радиус окружности, вписанной в деталь, параметр детали; R_ϕ — радиус фрезы, параметр инструмента; R_2 — эксцентриситет фрезы. Из схемы, приведенной на рис. 1, получим

$$L = R_1 + R_\phi + R_2.$$

Условие обеспечения прямолинейности циклоидальной траектории центра фрезы O_3 на линии центров O_1O_2 имеет вид [2]:

$$i = 1 \pm \sqrt{\frac{L}{R_2}}, \quad (2)$$

где знак «+» соответствует гипоциклоиде, знак «-» — эпи- и пероциклоиде.

При исследовании схемы обработки необходимо задать требуемые параметры детали (форма профиля, радиус вписанной окружности R_1) и выбранного инструмента (радиус фрезы R_ϕ) и с помощью уравнений (1) и (2) определить параметр станка L и эксцентриситет фрезы R_2 . В таблице приведены результаты расчета основных параметров схемы обработки шестигранника с прямыми гранями для разных значений i .

Таблица параметров схемы обработки шестигранника

R_1 , мм	R_ϕ , мм	i	L , мм	R_2 , мм
20	100	6	125	5
		-6	122,5	2,5
		6/5	-5	-125
		-6/5	151,25	31,25
		6/7	-2,5	-122,5
		-6/7	169	49

Согласно данным таблицы, при неизменных параметрах детали и фрезы для различных значений i , по которым получают шестигранник, прямолинейность грани на линии O_1O_2 обеспечивается при разных сочетаниях параметров L и R_2 .

Главное движение резания в схеме выполняется со скоростью относительного движения режущих элементов по циклоидальным траекториям. Скорость резания, которая представляет собой векторную сумму линейных скоростей вращения заготовки и фрезы в рассматриваемой точке относительной траектории, можно выбрать по нормативам. Движения подачи вдоль радиуса или оси детали на схемах не показаны и в работе не рассматриваются.

Особенностью ЦСО с эксцентричной фрезой является реализация многолезвийного резания при формировании грани профиля, что обеспечивает увеличение суммарной длины одновременно или последовательно работающих режущих кромок и их автоматическую смену.

При исследовании формы изделия целесообразно сначала рассмотреть траектории центра фрезы. На рис. 2 они представлены двумя шестигранниками с технически прямыми гранями, очерченными гипо- и эпициклоидой.

Параметры траекторий соответствуют данным таблицы. Очевидно, что шестигранник, описанный гипоциклоидой, более близок к идеальному шестиугольнику. Существенное отличие от правильного шестигранника наблюдается в наиболее удаленных от центра детали участках траектории.

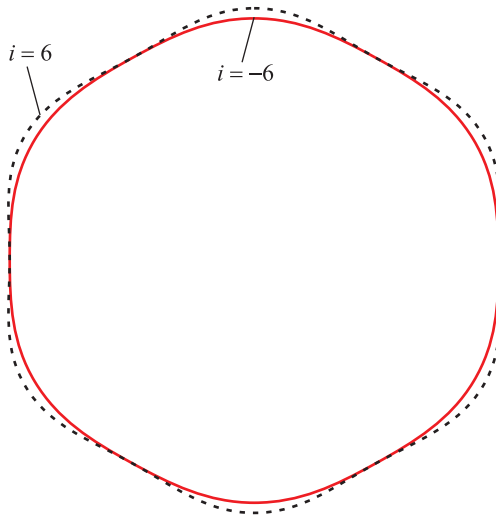


Рис. 2. Форма профиля в зависимости от циклоидальных траекторий

При реализации ЦСО происходит непрерывная трансформация фактических углов резания. Это приводит к изменению ориентации режущего клина инструмента при его движении по относительной траектории, что сказывается на условиях резания.

На рис. 3 показано, как изменяются углы резания при реализации ЦСО.

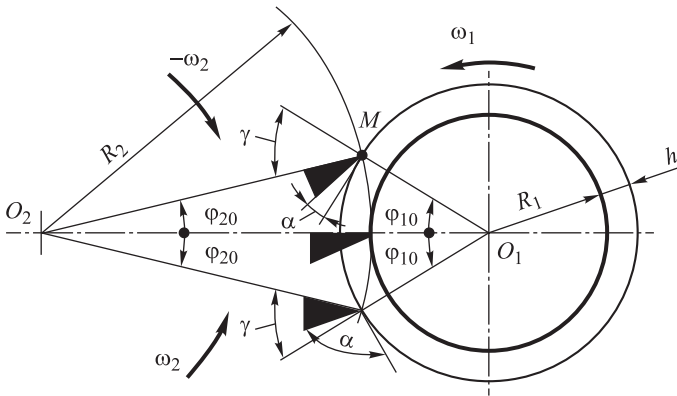


Рис. 3. Схема для определения углов резания при внешнем касании режущего элемента и изделия

Фактические углы резания определяются по формулам

$$\gamma = \gamma_{ст} \pm \psi, \quad \alpha = \alpha_{ст} \mp \psi, \quad (3)$$

где $\gamma_{ст}$, $\alpha_{ст}$ — статические углы резания (верхний знак (плюс или минус) соответствует попутному резанию, нижний — встречному); ψ — трансформация углов резания.

При попутном и встречном резании характер трансформации углов различен. Когда резец находится на линии центров O_1O_2 , фактические углы резания равны статическим углам. Трансформация углов резания

$$\Psi = \varphi_1 + \varphi_2.$$

Углы определяются по теореме косинусов из треугольника O_1O_2M . Например, в точке M максимум трансформации

$$\psi_0 = \arccos \left(\frac{R_2^2 + (R_1 + h)^2 - L^2}{2R_2(R_1 + h)} \right). \quad (4)$$

На рис. 3 режущий элемент имеет угол заточки $\gamma_{ст} = 0$, т. е. $\gamma = \pm\psi$.

Варианты ЦСО имеют сходства и различия с позиций влияния трансформации углов на процесс резания. Подбором соответствующих параметров ЦСО можно использовать трансформацию углов резания для улучшения условий работы режущих элементов.

Схема срезания припуска существенно влияет на процесс формообразования профиля и параметры режимов обработки. При исследованиях рассматривают множество вариантов совокупности параметров ЦСО, поэтому становится актуальной задача автоматического ее построения. На рис. 4 приведены построенные по соответствующему алгоритму схемы, иллюстрирующие рабочие участки циклоидальных траекторий отдельных точек режущих элементов.

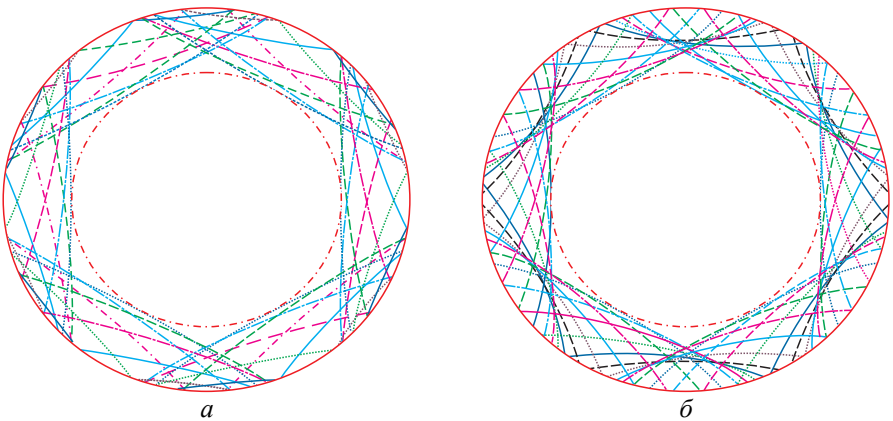


Рис. 4. Варианты схем срезания припуска:

а — встречное срезание ($i = 6$; $L = 125$ мм; $R_\phi = 100$ мм; $R_2 = 5$ мм);
б — попутное срезание ($i = -6$; $L = 122,5$ мм; $R_\phi = 100$ мм; $R_2 = 2,5$ мм)

Представлены лишь два варианта при $i = 6$ и $i = -6$ с учетом условия получения прямых граней (2) для небольшого количества зубьев фрезы ($z = 10$). Иллюстрации обеспечивают наглядность и возможность анализа очередности работы зубьев, закономерности изменения толщины срезаемого слоя, кинематической погрешности обработки при встречном и попутном резании и др. По схемам можно судить о профиле детали, форме относительных траекторий, длине пути резания каждого режущего элемента, характере изменения сечения срезаемого слоя в нормальном сечении профиля. Кроме того, можно определить и другие факторы, относящиеся к начальному этапу проектирования технологического процесса обработки. Например, можно выявить особенности распределения всего припуска между отдельными режущими элементами, определить возможную циклограмму их работы, а потом мгновенную и среднюю интенсивность съема припуска.

Для представленных вариантов схем характерно формирование одной грани несколькими режущими элементами из участвующих в обработке. Остальные режущие элементы фрезы не касаются грани и снимают меньший припуск. Очевидны различные значения и характер изменения кинематических углов резания у каждого режущего элемента.

Изменяя в программе основные параметры схемы (см. рис. 1), можно быстро определить характер и значение теоретически возможной погрешности обработки грани профиля.

Рассмотренную схему обработки некруглых профилей эксцентричной фрезой можно реализовать на станках различных технологических групп или на многоцелевых станках. При модернизации существующих станков их можно оснастить соответствующими узлами для получения второго вращательного движения, взаимосвязанного с имеющимся вращательным движением через требуемое отношение $i = \omega_2/\omega_1$. В многоцелевых станках реализация ЦСО осуществляется путем применения соответствующего приводного инструмента.

Выводы.

1. Примененный автоматизированный метод исследования относительных циклоидальных траекторий обработки некруглых профилей позволяет легко определить сходства и различия вариантов схем обработки.

2. Существует возможность расширения диапазона применяемых значений кинематического параметра i для получения некруглых профилей с разным числом граней.

3. С помощью разработанной программы автоматического построения схемы срезания припуска обеспечивается быстрый кинематический анализ ЦСО. Схемы при попутном и встречном резании имеют свои особенности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ярославцев В.М. Разработка методологии поиска новых методов обработки и ее практическая реализация. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2007, № 2, с. 56–70.
- [2] Скиба В.М. Анализ циклоидальных схем обработки некруглых профилей. *Известия высших учебных заведений. Сер. Машиностроение*, 2005, № 8, с. 52–58.
- [3] Зенин Н.В., Камсюк М.С. Технологические методы формообразования поверхностей бесшпоночных соединений. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2005, № 9, с. 35–40.
- [4] Зенин Н.В. Высокоскоростное фрезерование деталей бесшпоночных соединений на станках с числовым программным управлением. *Справочник. Инженерный журнал*, 2006, № 8, с. 19–22.
- [5] Бекасов Д.Л. Классификация схем фрезоточения некруглых профилей. *Технология машиностроения*, 2008, № 7, с. 10–13.
- [6] Бекасов Д.Л. Фрезоточение некруглых профилей с продольной подачей. *Технология машиностроения*, 2008, № 3, с. 9–10.
- [7] Иванов В.С., Зубков Н.Н., Иванов Д.В. Анализ кинематики процесса циклоидального формообразования при получении щелевых структур вращающимся лезвийным инструментом. *Технология машиностроения*, 2007, № 11, с. 13–15.
- [8] Иванов В.С., Иванов Д.В. Исследование процесса формирования щели на трубчатом профиле при обработке вращающимся лезвийным инструментом по параметрам траектории формообразования. *Технология машиностроения*, 2009, № 2, с. 21–25.
- [9] Тихонова А.А., Виноградов Д.В. Геометрическая шероховатость при попутном и встречном фрезеровании. *Известия высших учебных заведений. Сер. Машиностроение*, 2011, № 11, с. 68–71.
- [10] Скиба В.М. (СССР). *Способ обработки многогранных изделий*. А.с.1222433 СССР, опубл. 07.04.86, бюл. № 13, 4 с.

Статья поступила в редакцию 28.04.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Скиба В.М. Особенности кинематического анализа циклоидальных схем обработки некруглых профилей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/temp/1387.html>

Скиба Виктор Мартынович родился в 1939 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 54 публикаций. Область научных интересов: металлорежущие станки. e-mail: skiba1939@mail.ru

Kinematic analysis features of cycloidal processing schemes of non-circular profiles

© V.M. Skiba

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The author has analyzed features of forming non-circular profiles described by cycloidal curves and their equidistant curves. The research for the processing schemes of multifaceted details by an eccentric circular cutter has been carried out. A method of producing a multi-faceted profile by running of the forming circles related to the work piece and the cutter has been applied. Study of the scheme parameters and the relative trajectories of the tool were performed by using unified mathematical form of expressing cycloidal trajectories in the form of parametric equations. The influence on the shape of the faces of the machine parameters, tools and relationship of angular velocities of absolute movement is shown. To illustrate this, the parameters of processing schemes by an eccentric cutter ensuring the straightness of the product faces were determined. When studying product forms, the cutter center path was considered. The effect of the change of the shear layer cross-section and of kinematic cutting corners on the patterns of change in the force parameters of processing was educed. Schemes of cutting allowance were formed by using modern information technologies. The author provides features of passing certain relative trajectories of the cutter peaks via allowance. Recommendations on the use of research results are offered.

Keywords: kinematic analysis, forming, non-circular profile, cycloidal processing scheme, cutting corners, scheme of cutting allowance, the kinematic error.

REFERENCES

- [1] Yaroslavtsev V.M. *Vestnik MGTU imeni N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering*, 2007, no. 2, pp. 56–70.
- [2] Skiba V.M. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of the Higher Education Institutions. Machine Building*, 2005, no. 8, pp. 52–58.
- [3] Zenin N.V., Kamsyuk M.S. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii — Assembling in Mechanical Engineering, Instrument Making*, 2005, no. 9, pp. 35–40.
- [4] Zenin N.V. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal – Handbook. Engineering Journal*, 2006, no. 8, pp. 19–22.
- [5] Bekasov D.L. *Tekhnologiya Mashinostroeniya [Technology of Machine Building]*, 2008, no. 7, pp. 10–13.
- [6] Bekasov D.L. *Tekhnologiya Mashinostroeniya [Technology of Machine Building]*, 2008, no. 3, pp. 9–10.
- [7] Ivanov V.S., Zubkov N.N., Ivanov D.V. *Tekhnologiya Mashinostroeniya [Technology of Machine Building]*, 2007, no. 11, pp. 13–15.
- [8] Ivanov V.S., Ivanov D.V. *Tekhnologiya Mashinostroeniya [Technology of Machine Building]*, 2009, no. 2, pp. 21–25.
- [9] Tikhonova A.A., Vinogradov D.V. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of the Higher Education Institutions. Machine Building*, 2011, no. 11, pp. 68–71.

[10] Skiba V.M. (USSR). *Processing method of the multifaceted products*. Certificate of authorship 1222433 USSR, published 07.04.86, bull. no. 13, 4 p.

Skiba V.M. (b. 1939) graduated from Bauman Moscow higher technical school in 1968. Candidate of Engineering Sciences, associate professor at the Metal-cutting machines Department of Bauman Moscow State Technical University. Author of 54 publications. Research interests: metal cutting machines. e-mail: skiba1939@mail.ru