

УДК 621.713;621.9.04

doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-20-29

## К вопросу технологического обеспечения серийного производства циклоидальных шестерен

А.Н. Петровский<sup>1</sup>, Г.А. Дружинин<sup>2</sup>, А.И. Лаптев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «ИНЭКО»

<sup>2</sup> ПАО «НИТЕЛ»

## On the Issue of Technological Support for the Serial Production of Cycloid Pinions

A.N. Petrovskiy<sup>1</sup>, G.A. Druzhinin<sup>2</sup>, A.I. Laptev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО INEKO

<sup>2</sup> PAO NITEL

Технологическое обеспечение серийного производства предполагает рациональное нормирование точности изделий и разработку конкурентоспособного технологического процесса. Однако стандарты точности для циклоидальных передач не созданы, а технологическая литература не содержит описания их серийного производства. Предложен возможный алгоритм нормирования точности поверхностей циклоидального профиля и описан технологический процесс серийного производства циклоидальных шестерен. Алгоритм нормирования точности, разработанный на основе теории контактных деформаций, используется в системе автоматизированного проектирования циклоидальных передач как средство технологического контроля конструкторских решений. С целью сокращения себестоимости циклоидальных шестерен технологический процесс сформирован из многоместных и многопозиционных операций. Электроэрозионная обработка применена как метод формообразования, обеспечения точности и качества рабочих поверхностей. Пакет шестерен вырезают на проволочно-вырезном станке в одном установе из пакета пластин-заготовок, прошедших окончательную термическую обработку и плоское шлифование торцов. Достигнута достаточная для серийного производства производительность.

**Ключевые слова:** циклоидальная передача, серийное производство, нормирование точности, электроэрозионная обработка, проволочно-вырезной станок, пакетная обработка заготовок

Technological support for the serial production involves a rational normalization of the product accuracy and the development of a competitive technological process. However, the accuracy standards for cycloidal gears have not yet been developed, and literature does not contain information on their serial production. The authors propose a possible algorithm for normalizing the accuracy of surfaces of a cycloidal profile and a technological process for the serial production of cycloid pinions. The algorithm for normalizing the accuracy is developed on the basis of the theory of contact deformations, and it is used in the system of automated design of cycloidal gears as a mean of technological control of design solutions. In order to reduce the cost of cycloidal gears, the technological process of serial production is formed from multi-site and multi-position operations. Electro-erosion processing is used as a method of shaping, ensuring the accuracy and quality of working surfaces. A stack of gears is cut out on a wire-cutting machine in one run from a stack of blanks after finish heat treatment and flat grinding of the butts. The efficiency sufficient for the serial production is achieved.

**Keywords:** cycloidal gears, serial production, accuracy control, electroerosion treatment, wire-cutting machine, stacked workpiece machining

Передачи с внецентроидным циклоидальным зацеплением отличаются большими передаточными числами, высокой нагрузочной способностью и хорошим коэффициентом полезного действия. Широко применяющиеся в новых изделиях, они приходят на смену зубчатым цилиндрическим и червячным передачам в серийном производстве (СП).

Подробное описание внецентроидного циклоидального зацепления, результаты исследования его нагрузочной способности и проектные рекомендации даны в работах [1–6]. Их достаточно для разработки конструкторской документации. Затруднение вызывает подготовка СП циклоидальных передач, так как в технологической литературе пока не сформулирован рациональный подход к обработке основных деталей.

В известных публикациях сообщается о типовых технологических процессах [5, 7–9], затраты на которые ограничивают конкурентоспособность изделий.

Самые большие затруднения вызывает технологическое обеспечение СП изделий с поверхностями циклоидального профиля (ЦП). Это наиболее нагруженные, ответственные и дорогие детали циклоидальных передач.

В работе [9] рассмотрены два варианта технологического процесса изготовления циклоидального колеса, различающихся операциями обработки поверхности ЦП на станках с числовым программным управлением. В первом варианте обработка происходит на электроэрозионном проволочно-вырезном станке, во втором — на вертикально-фрезерном. В качестве основных недостатков электроэрозионной обработки указаны низкая производительность оборудования и, как следствие, высокая себестоимость изделий. Электроэрозионному проволочно-вырезному станку для обработки поверхности ЦП с максимальным диаметром 70 мм требуется 16 ч машинного времени, а вертикально-фрезерному станку с инструментом, оснащенный пластинами из кубического нитрида бора, — 3...4 ч. Повышение производительности оборудования и уменьшение себестоимости изделия авторы работы [9] связывают с возможным уменьшением точности обработки поверхностей ЦП.

Точность существенно влияет на качество и себестоимость изделий [10], поэтому СП долж-

но обеспечить рациональное сочетание этих показателей. Однако отсутствие обоснованных норм точности для циклоидальных шестерен (ЦШ) и низкая производительность оборудования препятствуют решению такой задачи.

Далее представлены результаты авторского подхода к нормированию точности поверхностей ЦП и разработке эффективного технологического процесса СП ЦШ.

Цель работы — создание алгоритма нормирования точности поверхностей ЦП, учитывающего влияние геометрических параметров и технологических отклонений на нагрузочную способность ЦШ; апробация алгоритма нормирования точности в автоматическом проектировании, технологическом контроле конструкторской документации и выборе оборудования СП ЦШ; разработка и производственная апробация технологического процесса, обеспечивающего точность и качество рабочих поверхностей ЦШ с достаточной для СП производительностью.

**Рабочие поверхности ЦШ.** На рис. 1 показана схема внецентроидной циклоидальной передачи, состоящей из пяти основных звеньев: кривошипа 1, ЦШ 2, цевочного колеса (ЦК) 3,

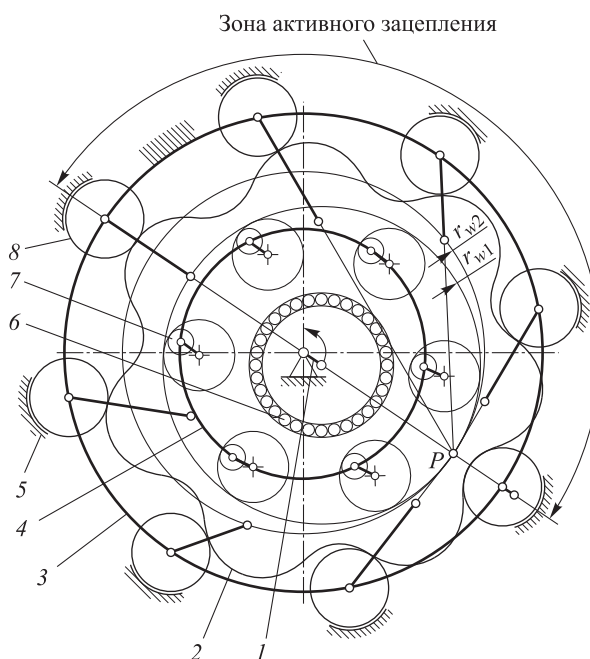


Рис. 1. Схема внецентроидной циклоидальной передачи

фланца 4 ведомого вала и стойки 5. На схеме также обозначены:  $r_{w1}$  и  $r_{w2}$  — радиусы центроид ЦШ и ЦК;  $P$  — полюс зацепления. Рабочие поверхности ЦШ образуют три группы высших кинематических пар: 1) поверхность центрального отверстия и тела качения 6 подшипника; 2) поверхность ЦП и цевок 8 колеса; 3) поверхности нецентральных отверстий и пальцы 7 фланца ведомого вала.

На рис. 1 каждая высшая кинематическая пара второй и третьей групп представлена своим эквивалентом — двумя низшими парами (шарнирами) и соединяющим их добавочным звеном [11]. Шарниры показаны как маленькие окружности, центры которых совпадают с центрами кривизны сопрягаемых профилей высшей пары. Добавочные звенья выделены отрезками жирной линии, которые демонстрируют связи передачи.

Из схемы, приведенной на рис. 1, следует, что циклоидальная передача является механизмом с избыточными связями, а ее достоинства (указанные ранее) обеспечены совместной работой множества высших кинематических пар, последовательно проходящих зону активного зацепления. Распределение нагрузки между кинематическими парами имеет статически неопределимый характер и зависит от точности исполнения ЦШ и связанных с ней звеньев. Отклонения размеров, формы и взаимного расположения рабочих поверхностей ЦШ, соизмеримые со значениями контактных деформаций, приводят к перегрузке кинематических пар и перегреву передачи.

**Деформации.** Для определения деформаций в контакте ЦШ с цевками рассмотрим геометрическую схему внецентроидного циклоидального зацепления (рис. 2).

Зацепление представлено в декартовых координатах  $XY$ , где  $O_1$  и  $O_2$  — оси ЦШ и ЦК;  $O_1O_2$  — водило;  $h$  — длина водила;  $d_{w1}$  и  $d_{w2}$  — диаметры центроид ЦШ и ЦК;  $n-n$  — общая нормаль центроид в полюсе зацепления  $P$ ;  $d_2$  — диаметр окружности центров цевок;  $d_c$  — диаметр цевки;  $\rho_0$  — радиус кривизны удлиненной эпициклоиды;  $\rho_1$  — радиус кривизны профиля ЦШ;  $\rho_2$  — радиус цевки;  $c$  — отрезок, соединяющий центр цевки и полюс зацепления  $P$ ;  $\alpha$  — угол зацепления;  $\beta$  — центральный угол цевки между полюсом и центром ЦК;  $\kappa$  — угол между отрезком  $c$  и осью  $Y$ ;  $x_0, y_0$  — координаты центра цевки и удлинен-



Рис. 2. Схема внецентроидного циклоидального зацепления

ной эпициклоиды;  $x, y$  — координаты точки контакта  $K$ ;  $\varphi$  — полюсный угол, определенный как центральный угол ЦК между центром цевки и полюсом зацепления;  $\varphi_H$  — угол поворота водила;  $\delta$  — сближение центров кривизны сопряженных профилей под нагрузкой;  $\Delta$  — угол деформаций, определенный как угол поворота ЦШ от принятой нагрузки, соответствующий сближению центров кривизны.

Вращающие моменты, воспринимаемые ЦШ и ЦК, вызывают деформации сопряженных поверхностей, находящихся в активной зоне зацепления. Сближение центров кривизны их профилей

$$\delta = 0,5d_{w1}\Delta \cos \alpha. \quad (1)$$

Для определения угла деформаций  $\Delta$  и угла зацепления  $\alpha$  воспользуемся результатами анализа распределения нагрузки в циклоидальном зацеплении, выполненного в работе [6]:

$$\Delta = \frac{4\sigma^2\rho^*}{\pi^2 Z_E^4 \cos \alpha} \ln \left[ \frac{3\pi Z_E^2 \left( \frac{\rho_0^*}{\rho^*} \right)^{1/2}}{2\sigma} \right]; \quad (2)$$

$$Z_E = \pi^{-1/2} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1/2}; \quad (3)$$

$$\rho^* = \frac{\rho_1^*\rho_2^*}{\rho_1^* + \rho_2^*}; \quad (4)$$

$$\cos \alpha = \frac{l \sin \varphi}{\sqrt{1+l^2-2l \cos \varphi}}, \quad (5)$$

где индексом «\*» обозначены линейные величины в масштабе  $r_{w1} = 0,5d_{w1} = 1$ ;  $\sigma$  — контактное напряжение, МПа;  $\rho^*$  — приведенный радиус кривизны сопряженных профилей;  $Z_E$  — коэффициент, учитывающий механические свойства материалов, МПа<sup>0,5</sup>;  $\nu_1, \nu_2$  — коэффициенты Пуассона материалов ЦШ и ЦК;  $E_1, E_2$  — модули упругости материалов ЦШ и ЦК, МПа;  $l$  — коэффициент внецентроидности,  $l = d_2/d_{w2}$ .

Согласно условию совместности деформаций, угол деформаций  $\Delta$ , являющийся постоянной величиной для всех мест контакта, может быть определен по месту с наибольшим контактным напряжением. Наибольшее напряжение возникает в месте, соответствующем точке с минимальным радиусом кривизны ЦП, для которой полюсный угол

$$\varphi_\sigma = \arccos \frac{1+2z_1-(z_1-1)l^2}{(z_1+2)l}, \quad (6)$$

минимальный радиус кривизны удлинённой эпициклоиды

$$\rho_{0\sigma}^* = c_\sigma \frac{3}{z_1+2}, \quad (7)$$

$$c_\sigma^* = u_H \sqrt{1+l^2-2l \cos \varphi_\sigma}, \quad (8)$$

и минимальный радиус кривизны ЦП

$$\rho_{1\sigma}^* = \rho_{0\sigma}^* - \rho_2, \quad (9)$$

где индексом « $\sigma$ » обозначены параметры в месте с наибольшим контактным напряжением;  $z_1$  и  $z_2$  — числа выступов ЦШ и цевки ЦК;  $u_H = z_2/z_1$  — передаточное число зацепления при неподвижном водиле.

Для передач, оптимизированных по методике, приведенной в работе [6]:

$$\Delta = \frac{\sigma_\sigma^2 \rho_{0\sigma}^*}{\pi^2 Z_E^4 \cos \alpha_\sigma} \ln \frac{3\pi Z_E^2}{\sigma_\sigma}; \quad (10)$$

$$\rho_{0\sigma}^* = \frac{3(z_1+1)\sqrt{3z_1(l^2-1)}}{z_1(z_1+2)^{3/2}}; \quad (11)$$

$$l = \frac{(2z_1+1)\sqrt{2}}{\sqrt{(2z_1+1)^2+(z_1-1)^2}}. \quad (12)$$

В серийном изделии наибольшее контактное напряжение не должно превышать допускаемо-

го, установленного расчетом на прочность. Принимая допускаемое контактное напряжение наибольшим, из выражений (1)–(12) получим сближение центров кривизны профилей:

- для допускаемого контактного напряжения  $\sigma_{HP}$

$$\delta_{HP} = 0,5d_{w1}\Delta_{HP} \cos \alpha_\sigma; \quad (13)$$

- для контактного напряжения  $\sigma_{HO}$ , не учитывающего дополнительную нагрузку от технологических отклонений поверхности,

$$\delta_{HO} = 0,5d_{w1}\Delta_{HO} \cos \alpha_\sigma, \quad (14)$$

где  $\Delta_{HP}$  и  $\Delta_{HO}$  — угловые деформации, рассчитанные по формуле (2) или (10), при  $\sigma = \sigma_{HP}$  и  $\sigma = \sigma_{HO}$ .

**Допуск формы.** Сближение центров кривизны (1) включает в себя деформации шестерни и цевки, поэтому допуск формы поверхности ЦП оптимизированных передач ( $\rho_{1\sigma}^* = \rho_2$ ) определяется половиной разности сближений центров кривизны из выражений (13) и (14):

$$\delta_\phi = 0,25d_{w1}(\Delta_{HP} - \Delta_{HO}) \cos \alpha_\sigma, \quad (15)$$

где  $\delta_\phi$  — допуск формы в радиусном выражении, мм.

Для передач со значительной разницей минимального радиуса кривизны ЦП и радиуса цевки допуск формы уточняется с учетом распределения деформаций между колесом и цевкой по формулам теории контактных деформаций [12].

**Алгоритм нормирования точности.** Выражения (1)–(15) образуют алгоритм нормирования точности поверхностей ЦП, который визуально представлен диаграммой (рис. 3), содержащей зависимости угла деформаций  $\Delta$  от числа выступов ЦШ  $z_1$  при различных значениях контактного напряжения  $\sigma$ . Из диаграммы следует, что увеличение числа выступов ЦШ сопровождается уменьшением угла деформаций, а повышение контактного напряжения — возрастанием  $\Delta$ . Угол зацепления  $\alpha_\sigma$  в кинематической паре с наибольшим контактным напряжением существенного влияния на угол деформаций не оказывает. На диаграмме показан график  $\cos \alpha_\sigma$ , который используется в выражении (10). Диаграмма позволяет оценить деформации в контакте ЦШ с цевками.

Для определения допуска формы ЦП углы деформаций, найденные по графикам для за-

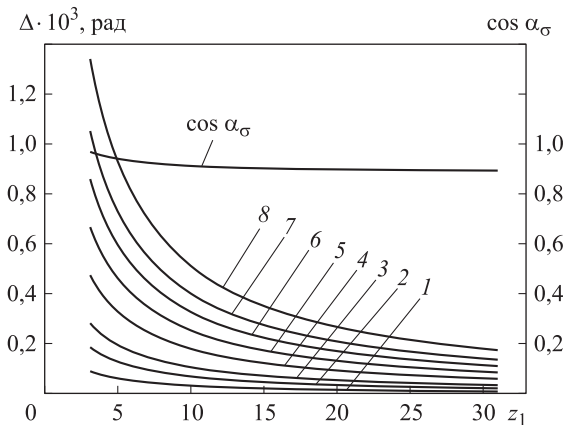


Рис. 3. Зависимость угла деформаций  $\Delta$  от числа выступов ЦШ  $z_1$  при контактном напряжении  $\sigma = 400$  (1), 600 (2), 800 (3), 1000 (4), 1200 (5), 1400 (6), 1600 (7) и 1800 МПа (8)

данных значений  $z_1$ ,  $\sigma_{НР}$  и  $\sigma_{НО}$ , подставляются в формулу (15).

**Пример.** Если допустимое контактное напряжение  $\sigma_{НР}$  принято равным 1000 МПа, а расчетное контактное напряжение  $\sigma_{НО}$ , не учитывающее дополнительную нагрузку от технологических отклонений поверхности ЦП, составляет 800 МПа, то для ЦШ с числом выступов  $z_1 = 7$  и диаметром центриды  $d_{w1} = 100$  мм допуск формы  $\delta_f = 0,003$  мм.

Нормирование точности поверхностей ЦП в интервале диаметров центриды 50...400 мм при условии  $\sigma_{НР} - \sigma_{НО} \leq 200$  МПа показало, что допуски формы соответствуют следующим стандартам: для ЦШ с числом выступов  $z_1 \leq 7$  — 7-6-му, для  $z_1 = 8...15$  — 6-му, для  $z_1 > 15$  — 6-5-му. Отметим, что большее число выступов характеризуется более высокой точностью, а ее снижение приводит к уменьшению нагрузочной способности.

Установленная закономерность дает возможность использовать резервы снижения точности, связанные с числом выступов шестерни, ее размерами и запасами нагрузочной способности. Такая необходимость возникает при недостаточной точности оборудования или деталей. В этих случаях алгоритм используется как критерий допущения станка к СП, а деталей — к применению.

Алгоритм нормирования точности включен в систему автоматизированного проектирования циклоидальных передач, где он используется для назначения допуска формы, его контроля и выбора оборудования СП ЦШ.

**Повышение производительности технологического процесса СП ЦШ** достигнуто применением многоместной пакетной обработки заготовок. Пакетная обработка заготовок на вертикально-фрезерных станках показала, что их число в пакете ограничено размерами режущей части инструмента и его жесткостью. Кроме того, использование металлорежущих станков связано с поэтапным достижением точности на нескольких операциях, передачей заготовок в термическое производство и окончательной обработкой закаленных поверхностей. Многооперационная обработка рабочих поверхностей ЦШ затрудняет достижение необходимой точности и растягивает технологический цикл во времени и пространстве.

Электроэрозионные проволочно-вырезные станки обеспечивают однооперационную пакетную обработку рабочих поверхностей ЦШ в одном установе из заготовок высокой твердости. Толщина пакета заготовок в этих станках может достигать 300 мм.

**Разработанный технологический процесс многоместной обработки ЦШ** содержит следующие операции: заготовительную, первую термическую, фрезерно-сверлильную, вторую термическую, пескоструйную, плоскошлифовальную, первую слесарную, проволочно-вырезную, вторую слесарную, промывочную и контрольную.

**Материал и заготовка.** ЦШ изготавливают из сталей, удовлетворяющих повышенным требованиям к износостойкости, упругости и контактной выносливости: ШХ15, 40ХМ [5], ХВГ [7] и т. п. Разработанный технологический процесс отработан на заготовках из стали 40Х.

Анализ напряженного состояния ЦШ [5, 13–15] показал, что ее нагрузочная способность лимитирована напряжениями контакта на рабочих поверхностях при отсутствии значительных растягивающих напряжений. Эта особенность позволяет получать заготовки из простого сортового проката (из листа, полосы, круга) и отказаться от поковок и штамповок.

**Заготовительная операция** предусматривает получение заготовки в виде дисков или квадратных пластин с припуском по толщине под последующие фрезерование и шлифование. Диаметр диска или размер квадрата должен превышать наружный диаметр ЦШ для надежного крепления в приспособлениях фрезерно-сверлильного и проволочно-вырезного станков.



В СП предпочтительны заготовки, полученные на заготовительно-отрезной операции. Отрезные станки обеспечивают выход заготовок с припуском под плоское шлифование торцов и исключают их предварительную фрезерную обработку.

*Первая термическая операция (отжиг или нормализация)* применяется при необходимости улучшения микроструктуры стали, снятия внутренних напряжений, снижения твердости и облегчения механической обработки.

*Фрезерно-сверлильная операция* предусматривает обработку заготовок по толщине с двух сторон под последующее плоское шлифование, сверление отверстий под болты технологического пакета и заправку проволоки. Для повышения производительности операция формируется как многоместная и/или многопозиционная на станке с числовым программным управлением.

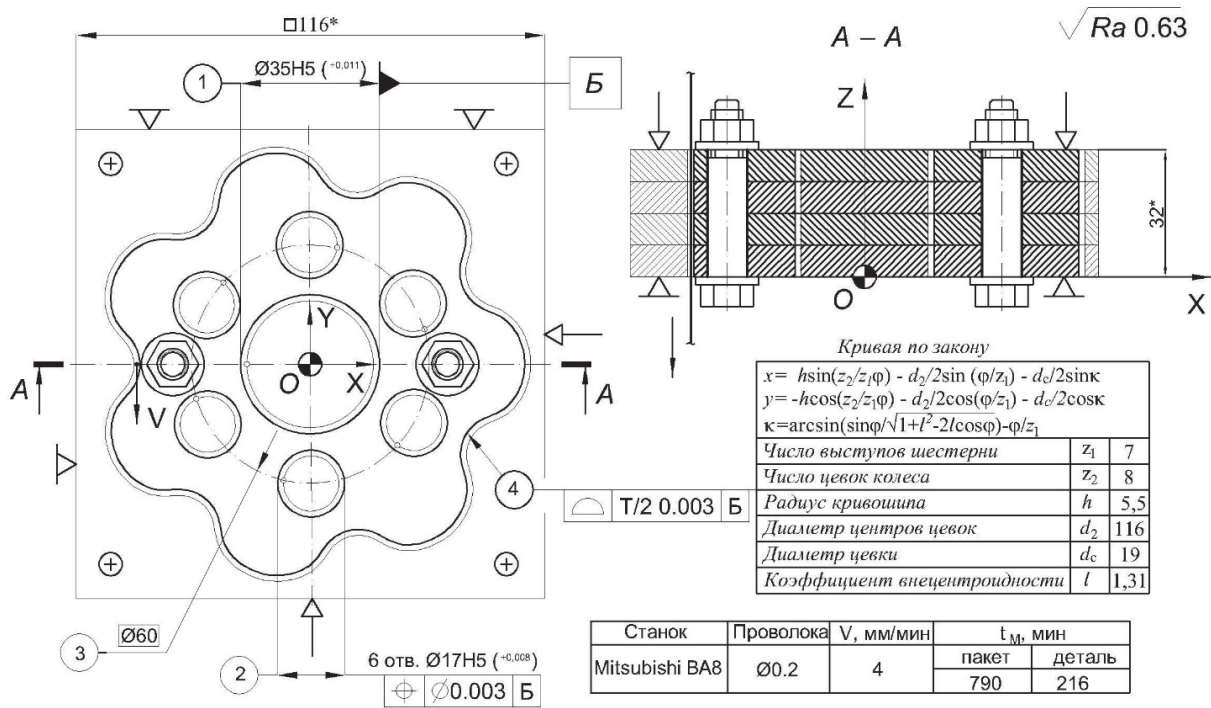
*Вторая термическая операция* состоит из закалки и отпуска заготовок в режимах, необходимых для достижения требуемой структуры и твердости используемой стали. Твердость заготовок в опытном технологическом процессе составляла 42...46 HRC по замерам на плоских торцах.

*Пескоструйная операция* обеспечивает очистку заготовок от окалины.

*Плоскошлифовальная операция* предусматривает многоместную обработку заготовок по толщине в двух установках с достижением необходимых показателей качества плоских поверхностей.

*Первая слесарная операция* включает в себя маркирование номера технологического пакета на шлифованных поверхностях заготовок и сборку этих пакетов. Маркирование обеспечивает применение в циклоидальных передачах с двумя и более зацеплениями совместно обработанных шестерен для равномерного распределения нагрузки между ними. Маркированные заготовки собираются в пакет на болтах, пропущенных через технологические отверстия, и стягиваются гайками.

*Проволочно-вырезная операция* выполнялась на проволочно-вырезном станке Mitsubishi BA8 (декларируемая точность получаемых размеров ±0,003 мм при шероховатости обработанных поверхностей Ra = 0,45...0,55 мкм). Технологический эскиз операции показан на рис. 4. Пакет из четырех заготовок закреплен на столе проволочно-вырезного станка с возможностью обработки рабочих отверстий и поверхностей ЦП в одном установе. Для исключения погрешностей установки переборка и переустановка пакета не допускаются.



\*Размеры для справок

Рис. 4. Технологический эскиз проволочно-вырезной операции

Построение ЦП проведено в САD-системе КОМПАС с помощью команды «Кривая по закону», обеспечивающей ввод параметрического уравнения ЦП.

Профиль ЦШ представляет собой эквидистанту удлинённой эпициклоиды, геометрические параметры которой приведены в декартовых координатах XY на рис. 2.

Из схемы, приведенной на рис. 2, следуют параметрические уравнения профиля

$$x = h \sin \frac{z_2}{z_1} \varphi - \frac{d_2}{2} \sin \frac{\varphi}{z_1} - \frac{d_c}{2} \sin \kappa; \quad (16)$$

$$y = -h \cos \frac{z_2}{z_1} \varphi + \frac{d_2}{2} \cos \frac{\varphi}{z_1} - \frac{d_c}{2} \cos \kappa; \quad (17)$$

$$\kappa = \arcsin \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1+l^2}} - \frac{\varphi}{z_1}; \quad (18)$$

$$l = \frac{d_2}{d_{w2}} = \frac{d_2}{z_2 h}. \quad (19)$$

Выражения (16)–(19) определяют координаты точек ЦП как функции основных размеров передачи: радиуса кривошипа  $h$ ; диаметра окружности центров цевок  $d_2$  и диаметра цевки  $d_c$ . Такой вид параметрического уравнения позволяет программировать ЦП по размерам чертежей, исключая ошибки их перевода в параметры уравнений известных видов [1–6].

Применение параметрического уравнения в моделировании детали исключает расчет координат точек профиля и построение их сплайна. Для перевода в управляющую программу профили всех обрабатываемых поверхностей из САD-модели в среде КОМПАС

импортированы в формат DXF с добавлением точек захода проволоки. Файл DXF поступает на устройство числового программного управления станка, которое автоматически генерирует управляющую программу. Технологические параметры устанавливает оператор в диалоговом режиме.

Вырезание пакета шестерен начинают с отверстий и заканчивают поверхностью ЦП. Все поверхности обрабатываются за четыре прохода со средней скоростью вырезания 4 мм/мин. Машинное время обработки составляет, мин: для центрального отверстия диаметром 35 мм — 110, для шести отверстий диаметром 17 мм — 320, для ЦП длиной 360 мм — 360. Машинное время операции — 790 мин на пакет из четырех деталей и 198 мин (3,3 ч) на одну деталь.

Электроэрозионная обработка не оказала заметного влияния на твердость детали. Замеры твердости через 0,5 мм от поверхности резания к оси детали не выявили ее изменения: разброс полученных значений твердости не превышал погрешности измерений. Спекание пакета деталей и нарушение геометрии кромок также не обнаружены.

*Вторая слесарная операция* предусматривает разборку технологического пакета и укладку деталей в межоперационную тару.

*Промывочная операция* обеспечивает удаление технологических загрязнений перед окончательным контролем.

*Контрольная операция* выполнялась в контрольно-измерительной машине DEA Global Advantage. Размеры и расположение отверстий (см. таблицу) отслеживались базовым программным модулем. Отклонения ЦП измеря-

### Результаты контроля рабочих поверхностей ЦШ

Объект	Размер, мм	Ra, мкм	Параметр	Отклонение	Заключение
Отверстие	Ø35H5 <sup>(+0,011)</sup>	0,63	Диаметр	$\delta_{\max} = +0,010$ мм	В допуске
			Цилиндричность	$\delta_{\max} = 0,005$ мм	
			Шероховатость	$Ra = 0,63$ мкм	
Отверстие	Ø17,04H5 <sup>(+0,008)</sup>	0,63	Диаметр	$\delta_{\max} = +0,006$ мм	То же
			Цилиндричность	$\delta_{\max} = 0,005$ мм	
			Шероховатость	$Ra = 0,63$ мкм	
Расположение	Ø60±0,002	–	Позиционный допуск	$\delta_{\max} = +0,002$ мм	»
Циклоидальный профиль	См. уравнения (16, 17)	–	Допуск формы	$\delta_{\max} = +0,002$ мм	»

Примечание.  $\delta_{\max}$  — максимальное отклонение контролируемого размера.

лись в специальном модуле SCREW программного обеспечения QUINDOS, где также вводилось параметрическое уравнение, с которым программа сравнивала реальный ЦП.

Результаты контроля показали возможность увеличения числа деталей в технологическом пакете проволочно-вырезной операции с целью дальнейшего повышения производительности.

По сравнению с обработкой ЦШ на металлорежущих станках представленный технологический процесс позволяет уменьшить число операций технологического цикла, штучное время и себестоимость изделия, а также увеличить число обрабатываемых деталей в цикле.

**Результаты работы.** Создан и апробирован в производстве алгоритм нормирования точности поверхностей ЦП, используемый в следующих задачах подготовки и обеспечения СП:

- анализ влияния технологических отклонений поверхностей ЦП на нагрузочную способность циклоидального зацепления;
- объективное нормирование допусков формы поверхностей ЦП при разработке и технологическом контроле конструкторской документации;
- автоматическое назначение и контроль допусков формы поверхностей ЦП в системах автоматизированного проектирования;
- объективный выбор оборудования для СП ЦШ по показателям точности.

Подтверждена возможность достижения заданной алгоритмом точности на проволочно-вырезных станках.

Технологический процесс СП ЦШ с однооперационной обработкой рабочих поверхностей пакета деталей на проволочно-вырезном станке обеспечил снижение их себестоимости при достаточной для СП производительности.

## Выводы

1. Объективное нормирование точности поверхностей ЦП требует учета напряжений и деформаций в контакте ЦШ с цевками.
2. Нормирование точности поверхностей ЦП реализовано алгоритмом, разработанным на основе теории контактных деформаций.
3. Алгоритм нормирования точности поверхностей ЦП, включенный в состав системы автоматизированного проектирования циклоидальных передач, используется для технологического контроля конструкторской документации и выбора оборудования СП ЦШ.
4. Электроэрозионная обработка на проволочно-вырезном станке применена как способ формообразования, достижения требуемых точности и качества рабочих поверхностей пакета ЦШ.
5. Спекание пакета ЦШ, снижение твердости обработанных поверхностей и нарушение геометрии кромок на проволочно-вырезной операции не выявлены.
6. Обработка пакета ЦШ на проволочно-вырезном станке обеспечивает рост его производительности, кратный числу деталей в пакете, сокращение металлорежущих станков в технологическом процессе и, как следствие, снижение себестоимости изделия.

## Литература

- [1] Литвин Ф.Л. *Теория зубчатых зацеплений*. Москва, Наука, 1968. 584 с.
- [2] Кудрявцев В.Н. *Планетарные передачи*. Москва, Ленинград, Машиностроение, 1966. 308 с.
- [3] Алипиев О.Л. *Геометрия и формообразоване на епи- и хипоциклоидни колела от коригирани циклопредавки*. Дис. ... док. техн. наук. Русе, 1990. 208 с.
- [4] Borislavov B., Borisov I., Panchev V. *Design of a Planetary-Cyclo-Drive Speed Reducer Cycloid Stage, Geometry, Element Analyses*. Linnaeus University, SwePart Transmissions AB, Växjö, 2012-05-30. 90 p.
- [5] Chmurawa M. *Obiegowe przekładnie cykloidalne z modyfikacją zazębienia*. Gliwice, Politechnika śląska, Zeszyty naukowe Nr. 1547, 2002. 204 p.
- [6] Петровский А.Н., Воронков С.А. Оптимизация геометрических параметров циклоидального зацепления. *Вестник машиностроения*, 2016, № 4, с. 28–35.
- [7] Шарамыгин С.А., Никитков Н.В. Особенности конструкции и технологии производства планетарно-цевочных редукторов. *Неделя Науки СПбПУ. Научный форум с международным участием. Матер. науч.-практ. конф.*, Санкт-Петербург, 01–06 декабря 2014, Санкт-Петербург, СПбПУ, 2015, с. 264–267.



- [8] Логинов А.А., Дегтярев В.В. Особенности конструкции и технологии производства циклоидальных редукторов (тип RV). *Неделя Науки СПбПУ. Научный форум с международным участием. Матер. науч.-практ. конф.*, Санкт-Петербург, 01–06 декабря 2014, Санкт-Петербург, СПбПУ, 2015, с. с. 254–259.
- [9] Покатилов Д.А., Ефременков Е.А. Анализ технологического процесса изготовления циклоидального профиля деталей передачи с промежуточными телами качения. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2015, т. 17, № 2(4), с. 868–873.
- [10] Виноградов В.М., Черепяхин А.А. Параметрическая оптимизация зубообрабатывающих операций. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*, 2013, т. 2, № 1(15), с. 22–30.
- [11] Артоболевский И.И. *Теория механизмов и машин*. Москва, Наука, 1988, с. 44–47.
- [12] Биргер И.А., Пановко Я.Г., ред. *Прочность, устойчивость, колебания*. В 3 т. Т. 2. Москва, Машиностроение, 1968. 463 с.
- [13] Warda B., Duda H. A method for determining the distribution of loads in rolling pairs in cycloidal planetary gear. *Tribologia*, 2017, № 1, pp. 105–111.
- [14] Thube S.V., Bobak T.R. Dynamic Analysis of a Cycloidal Gearbox Using Finite Element Method. *American Gear Manufacturers Association Fall Technical Meeting*, 2012, pp. 241–253.
- [15] Каратушин С.И., Храмова Д.А., Бокучава П.Н. Моделирование контактных нагрузок в среде ANSYS для неэвольвентных зацеплений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 2, с. 68–74, doi: 10.18698/0536-1044-2018-2-68-74

## References

- [1] Litvin F.L. *Teoriya zubchatykh zatsepleniy* [The theory of gearing]. Moscow, Nauka publ., 1968. 584 p.
- [2] Kudryavtsev V.N. *Planetarnyye peredachi* [Planetary gears]. Moscow, Leningrad, Mashinostroyeniye publ., 1966. 308 p.
- [3] Alpiyev O.L. *Geometriya i formoobrazovane na epi- i khipotsikloidni kolela ot korigirani tsi-klopredavki*. Dokt. Diss. [Geometry and Formulation of Epic and Hypocycloidal Cycles from Corrected Cyclopedes. Doct. Diss.]. Ruse, 1990. 208 p.
- [4] Borislavov B., Borisov I., Panchev V. *Design of a Planetary-Cyclo-Drive Speed Reducer Cycloid Stage, Geometry, Element Analyses*. Linnaeus University, SwePart Transmissions AB, Växjö, 2012-05-30. 90 p.
- [5] Chmurawa M. *Obiegowe przekładnie cykloidalne z modyfikacją zażębienia* [Cycloidal planetary gears meshing modification]. Gliwice, Politechnika śląska, Zeszyty naukowe Nr. 1547, 2002. 204 p.
- [6] Petrovskiy A.N., Voronkov S.A. Optimization of geometric parameters of non-centroid cycloidal gear. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2016, no. 4, pp. 28–35 (in Russ.).
- [7] Sharamygin S.A., Nikitkov N.V. Features constructions and technologies manufacturing planetary-cementing. *Nedelya Nauki SPbPU. Nauchnyy forum s mezhdunarodnym uchastiyem. Mater. nauch.-prakt. konf.* [Sunday Science SPbSTU. Nautical forum with international participation, material scientific and practical conferences]. Sankt-Petersburg, 01–06 December 2014, Sankt-Petersburg, Publishing House of Polytechnical University, 2015, pp. 264–267.
- [8] Loginov A.A., Degtyarev V.V. Osobennosti konstruksii i tekhnologii proizvodstva tsi-kloidal'nyh reduktorov (tip RV) [Features of constructions and technologies production of cyclodehydrates (type RV)]. *Nedelya Nauki SPbPU. Nauchnyy forum s mezhdunarodnym uchastiem. Mat. nauch.-prakticheskoy konf.* [Sunday Science SPbSTU. Nautical forum with international participation, material scientific and practical conferences]. Sankt-Petersburg, 01–06 December 2014, Sankt-Petersburg, Publishing House of Polytechnical University, 2015, pp. 254–259.
- [9] Pokatilov D.A., Efremenkov E.A. The analysis of technological process production of cycloidal profile of transfer details with intermediate rolling elements. *Izvestia of Samara Sci-*

- entific Center of the Russian Academy of Sciences, 2015, vol. 17, no. 2(4), pp. 868–873 (in Russ.).
- [10] Vinogradov V.M., Cherepahin A.A. Parametric optimization of gear cutting operations. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2013, vol. 2, no. 1(15), pp. 22–30 (in Russ.).
- [11] Artobolevskiy I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Machine mechanics and machine theory]. Moscow, Nauka publ., 1988, pp. 44–47.
- [12] *Prochnost', ustoychivost', kolebaniya* [Strength, stability, vibrations]. Ed. Birger I.A., Panovko Ya.G. Vol. 2. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1968. 463 p.
- [13] Warda B., Duda H. A method for determining the distribution of loads in rolling pairs in cycloidal planetary gear. *Tribologia*, 2017, no. 1, pp. 105–111.
- [14] Thube S.V., Bobak T.R. Dynamic Analysis of a Cycloidal Gearbox Using Finite Element Method. *American Gear Manufacturers Association Fall Technical Meeting*, 2012, pp. 241–253.
- [15] Karatushin S.I., Khramova D.A., Bokuchava P.N. Simulation of Contact Loads in the ANSYS Environment for Non-Involute Meshing. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 2(695), pp. 68–74 (in Russ.), doi: 10.18698/0536-1044-2018-2-68-74

Статья поступила в редакцию 01.10.2018

## Информация об авторах

**ПЕТРОВСКИЙ Александр Николаевич** — кандидат технических наук, доцент, директор ООО «ИНЭКО» (603040, Нижний Новгород, Российская Федерация, ул. Ефима Рубинчика, д. 14-32, e-mail: eneco@aport.ru).

**ДРУЖИНИН Георгий Александрович** — заместитель главного технолога. ПАО «НИТЕЛ» (603009, Нижний Новгород, Российская Федерация, пр-т Гагарина, д. 37, e-mail: gedruzh@mail.ru).

**ЛАПТЕВ Александр Игоревич** — инженер-технолог. ПАО «НИТЕЛ» (603009, Нижний Новгород, Российская Федерация, пр-т Гагарина, д. 37, e-mail: alxlp@mail.ru).

## Information about the authors

**PETROVSKIY Aleksandr Nikolaevich** — Candidate of Science, Associate Professor, Director ООО INEKO (603040, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Efim Rubinchik St., Bldg. 14-32, e-mail: eneco@aport.ru).

**DRUZHININ Georgiy Aleksandrovich** — Deputy Chief Manufacturing Engineer. PAO NITEL (603009, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Gagarin Ave., Bldg. 37, e-mail: gedruzh@mail.ru).

**LAPTEV Aleksandr Igorevich** — Manufacturing Engineer. PAO NITEL (603009, Nizhny Novgorod, Russian Federation, Gagarin Ave., Bldg. 37, e-mail: alxlp@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Петровский А.Н., Дружинин Г.А., Лаптев А.И. К вопросу технологического обеспечения серийного производства циклоидальных шестерен. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 12, с. 20–29, doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-20-29

### Please cite this article in English as:

Petrovskiy A.N., Druzhinin G.A., Laptev A.I. On the Issue of Technological Support for the Serial Production of Cycloid Pinions. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 12, pp. 20–29, doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-20-29