

УДК 621.923

А.А. ПЕРМЯКОВ, А.А. КЛОЧКО, Ю.А. СИНИЦА

СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ РЕЕК СПАРЕННЫМИ ФРЕЗАМИ

Наведено аналітичні залежності для визначення миттєвої площі перетину зрізаного шару і встановлені технологічні параметри стабілізації процесу формоутворення. Теоретично доведено, що характер зміни миттєвих параметрів формоутворення для певних умов обробки визначає параметри стабілізації і можливість управління якістю і точністю поверхневого шару зубчастих рейок. Оптимальний кут неузгодженості між зуб спарених дискових зуборізних фрез задають з умови найменшого значення середньоквадратичного відхилення сили різання від її середнього значення. Методика постановки задачі по аналітичному дослідженню, за допомогою програмного забезпечення технологічних параметрів обробки, що впливають на нестационарність формоутворення задається параметрами зубчастого виробу.

Ключові слова: технологічні параметри, лезова обробка, зубчаста рейка, спарена фреза, параметри стабілізації, кут неузгодженості, сила різання.

Приведены аналитические зависимости для определения мгновенной площади сечения срезаемого слоя и установлены технологические параметры стабилизации процесса формообразования. Теоретически доказано, что характер изменения мгновенных параметров формообразования для определенных условий обработки определяет параметры стабилизации и возможность управлением качеством и точностью поверхностного слоя зубчатых реек. Оптимальный угол рассогласования между зубьями спаренных дисковых зуборезных фрез задают из условия наименьшего значения среднеквадратичного отклонения силы резания от ее среднего значения. Методика постановки задачи по аналитическому исследованию, с помощью программного обеспечения технологических параметров обработки, влияющих на нестационарность формообразования задается параметрами зубчатого обрабатываемого изделия.

Ключевые слова: технологические параметры, лезвийная обработка, зубчатая рейка, спаренная фреза, параметры стабилизации, угол рассогласования, сила резания.

Analytical dependencies are given for determining the instantaneous cross-sectional area of the cut layer and the technologic parameters of the stabilization of the forming process are established. It has been theoretically proved that the nature of the change in the instantaneous shaping parameters for certain processing conditions determines the stabilization parameters and the possibility to control the quality and accuracy of the surface layer of the rack gears. The optimum angle of mismatch between the teeth of twin disc cutters is set from the condition of the smallest value of the root-mean-square deviation of the cutting force from its mean value. The method of statement of the problem on analytical research, with the help of software technological processing parameters, affecting the nonstationary formation is specified by the parameters of the toothed workpiece.

Keywords: Technological parameters, blade processing, rack, paired milling cutter, stabilization parameters, angle of mismatch, cutting force.

Постановка проблеми. При формообразовании зубьев реек методом профильного копирования дисковыми фрезами [1] или набором дисковых фрез не достигается требуемое качество обрабатываемой поверхности зубьев и их точность. Основными причинами снижения качества обрабатываемой поверхности являются повышенный износ режущей части инструмента в результате прерывистости процесса обработки, неравномерности снятия припуска, повышенной вибрации при врезании зуба фрезы при котором изменяется нагрузка на режущую кромку, что приводит к дестабилизации процесса формообразования. Стабилизация процесса формообразования выражается изменением силы резания в зависимости от траектории движения инструмента и выбранной схемы резания.

Анализ последних исследований и публикаций. Важным параметром обеспечения стабилизации процесса формообразования является количество одновременно находящихся в зоне обработки зубьев фрез. С учетом свободного размещения стружки во впадине стружечной канавки при фрезеровании стали с глубиной резания t и подачей на зуб S_z наибольшее число зубьев фрезы Z диаметром D определяется по формуле [1] $Z=0,2 D^{0,5} \cdot S_z^{0,5}$ и для общемашиностроительных нормативов регламентируется в пределах 6-14, что предопределяет одновременное нахождение в зоне обработки 0-2 зуба фрезы, т.е. коэффициент перекрытия $0 \leq K_n \leq 2$ и является одной из причин дестабилизации процесса обработки. Нестабильность процесса формообразования негативно отражается на качестве поверхностного слоя зубьев, его эксплуата-

ционных свойствах, что подтверждается теоретическими и практическими исследованиями в области оптимизации параметров состояния поверхностного слоя деталей машин [5, 6, 7]. Контактное взаимодействие реальных поверхностей зубьев реек и сопрягаемых зубчатых колес показывает, что характер деформации микронеровностей и волн определяется в значительной мере их физико-механическими характеристиками, которые, в свою очередь, изменяются в результате пластических и упругих деформаций, вызванных непосредственным давлением режущей кромки инструмента и нестабильностью процесса формообразования.

Цель работы – обеспечение показателей качества поверхностного слоя и повышение эксплуатационных характеристик зубчатых реек, путем стабилизации процесса формообразования. **Изложение основного материала.** Фрезерование зубьев зубчатых реек осуществляется с использованием спаренных дисковых зуборезных фрез 1 и 2, которые имеют определенный шаг, кратный нарезаемому шагу зубчатого изделия, при этом кратность выражается целым числом (рис. 1). В зоне обработки при съеме металла постоянно находится три и более зубьев 3-5, при этом передняя поверхность зуба 5 фрезы 2 располагается между двумя передними поверхностями зубьев 3 и 4 фрезы 1. При выходе из зоны резания зуба 3 фрезы 1 последующий зуб 4 фрезы 1 входит в зону резания, но при этом в зоне резания находится зуб 5 фрезы 2, расположенный под определенным углом рассогласования по отношению к зубьям фрезы, который обуславливает стационарность технологических параметров

© А.А. Пермяков, А.А. Клочко, Ю.А. Синица, 2017

профильного формообразования. Во время обработки зубья 3 и 4 фрезы 1 и зубья 5 и 6 фрезы 2 контактируют с изделием 7. Угловой шаг между зубьями фрез Δ , а наибольший угол контакта зубьев фрезы с обрабатываемым изделием Ψ_{\max} . Шаг между зубьями спаренных фрез модулем m выражением $t = \pi \cdot m$, причем зубья фрез 1 и 2 располагают при виде с торца под углом рассогласования $\beta_{\text{отг}}$ [2].

Оптимальный угол рассогласования между зубьями спаренных дисковых зуборезных фрез задают из условия наименьшего значения среднеквадратичного отклонения силы резания от ее среднего значения.

Методика постановки задачи по аналитическому исследованию, с помощью программного обеспечения технологических параметров обработки, влияющих на нестационарность формообразования задается параметрами зубчатого обрабатываемого изделия: m - модуль зацепления; исходный контур зубьев, геометрические размеры изделия, ширина впадины B ; параметрами дисковой зуборезной фрезы: $D = 2 \cdot R$ - наружный диаметр фрезы; α - угол профиля, Z - число зубьев фрезы; режимами резания: подача на зуб S_z , постоянные коэффициенты A_1, A_2 , характеризующие условия обработки.

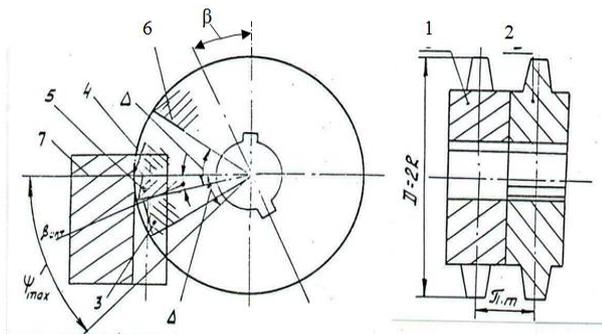


Рис. 1 – Синтез параметров операции зубонарезания реек спаренными дисковыми фрезами: 1 -спаренная дисковая зуборезная фреза левая; 2 -спаренная дисковая зуборезная фреза правая; 3, 4 -смежные режущие зубья фрезы левой; 5, 6 -смежные режущие зубья фрезы правой; 7 – обрабатываемая зубчатая рейка

Конструкторско-технологические данные: свойства обрабатываемого материала учитываются коэффициентами C_1, K , приведенными в [3]; способ профильного формообразования зубьев реек дисковыми зуборезными фрезами по одной из схем, приведенных на рис.2.

Таким образом необходимо определить оптимальный угол β между зубьями спаренных дисковых зуборезных фрез при виде с торца (рис. 1) из условий минимального колебания результирующей силы резания $P_{\text{общ}}$ при различных схемах формообразования (рис. 2).

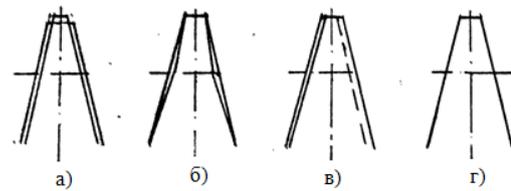


Рис. 2 – Схема профильного формообразования зубьев реек: а – прогрессивная схема формообразования с чередованием вершинных и профильных зубьев инструмента; б – прогрессивная схема формообразования с чередованием вершинных и профильных зубьев инструмента с «протуберанцем»; в – прогрессивная схема формообразования с чередованием профильно-вершинных односторонних зубьев инструмента с левым и правым профилями; г – контурный полный способ формообразования

Методика расчета.

Рассматривается наиболее общий способ формообразования зубьев реек контурным фрезерованием по всему профилю (рис.2, г). Сила резания при обработке впадины одним зубом в общем виде может быть представлена выражением

$$P_1 = C_1 \cdot S_z^{k+1} \cdot \sin^{k+1} \alpha \cdot \psi \cdot \left[B + A_3 \cdot \sin^{k+1} \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}} \cdot \left(R - \frac{R-2,25 \cdot m}{\cos \psi} \right) \right], \quad (1)$$

$$\text{где } A_1 = C_1 S_z^{k+1}; \quad A_2 = \left[A_3 \cdot \sin^{k+1} \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}} \right];$$

$A_3 = 1$ при обработке левого или правого профиля; $A_3 = 2$ при обработке левого и правого профилей одновременно.

Выражение (1) запишем в виде

$$P_1 = P_1(\psi) = C_1 \cdot S_z^{k+1} \cdot \sin^{k+1} \alpha \cdot \psi \cdot \left[B + A_2 \cdot A_3 \cdot \left(R - \frac{R-2,25 \cdot m}{\cos \psi} \right) \right], \quad (2)$$

где B - ширина впадины зуба обрабатываемой рейки 7.

Выражение (2) при соответствующем значении ширины впадины B и коэффициента A_3 описывает значение силы резания при выборе любого способа профильного формообразования зубьев реек.

Суммарная сила резания при нахождении в зоне резания двух или одного зубьев одной фрезы при изменении угла контакта Ψ по ниже приведенной формуле:

$$P(\psi) = \left\{ \begin{array}{l} P_1(\psi) + P(\psi + \Delta), \text{ если } 0 \leq \psi \leq (\psi_{\max} - \Delta) \\ P_1(\psi), \text{ если } (\psi_{\max} - \Delta) \leq \psi \leq \Delta \end{array} \right\}, \quad (3)$$

где $\Delta = \frac{360^\circ}{z}$ - угол между зубьями 3 и 4 фрезы 1 и соответственно между зубьями 5 и 6 фрезы 2 (рис. 3), $\psi_{\max} = \arccos \left(1 - \frac{2,25 \cdot m}{R} \right)$ - наибольший угол кон-

такта.

Результирующая сила резания $P_{общ}$ при использовании спаренных фрез 1 и 2 с углом рассогласования β зубьев фрезы 2 относительно фрезы 1 определяется функцией:

$$P_{общ} = P(\psi) + P(\psi + \beta), \quad (4)$$

где $P(\psi)$ - сила резания при обработке одной фрезой; $P(\psi + \beta)$ - сила резания при обработке 2-й фрезой, зубья которой расположены по отношению к зубьям 1-й фрезы под углом β при виде с торца, $P_{общ}$ - результирующая сила резания при использовании спаренных фрез с углом рассогласования β зубьев 2-й фрезы относительно зубьев 1-й фрезы при виде с торца.

Изменение параметра $\beta_{опт}$ зубонарезания реек при обеспечении стабилизации процесса формообразования спаренными фрезами показано на рис.3.

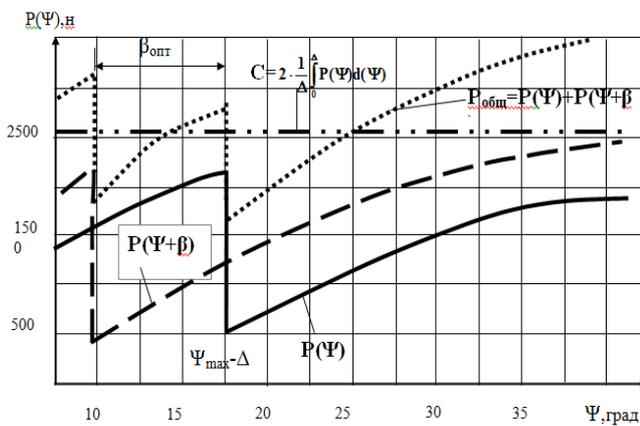


Рис. 3 – Изменение параметра $\beta_{опт}$ зубонарезания реек при обеспечении стабилизации процесса формообразования спаренными фрезами

Среднее значение силы резания C при обработке спаренными фрезами из формулы (3) и (4) определяется интегральной функцией:

$$C = 2 \cdot \frac{1}{\Delta} \cdot \int_0^{\Delta} P(\psi) d\psi, \quad (5)$$

Находится наименьшее расстояние ρ_{min} между интегральными функциями среднеквадратичного отклонения $P_{общ}$ от постоянной $C(5)$

$$\rho_i = \sqrt{\int [P(\psi) + P(\psi + \beta) - C]^2 \cdot d\psi}, \quad (6)$$

в интервале изменения β от $0 \leq \beta \leq \Delta$, где интервал $i = 1, 2, \dots, N$ с шагом $h = \frac{\Delta}{N}$.

Среди полученных значений ρ_i выбирается

наименьшее ρ_{min} , которое соответствует оптимуму угла рассогласования $\beta_{опт}$.

На основании изложенного метода разработан алгоритм выбора оптимальных параметров угла между зубьями спаренных дисковых зуборезных фрез.

Блок-схема алгоритма нахождения ρ_{min} и $\beta_{опт}$ представлена на рис.4.

Данный способ фрезерования зубьев спаренными фрезами реализуется при обработке зубчатых изделий модулем до 40мм на режимах резания соответствующим общемашиностроительным.

Инструмент может быть оснащен режущей частью из быстрорежущей стали P6M5K5 (СНГ), S6-5-2-5 (Германия), SKH55 (Япония) или марками твердого сплава подгруппы применения по ISO K10-K20 - МК8 (MC318), M10 - MF1 (MC3215), P15-P20 - MF2 (MC1466).

На базе этого алгоритма разработана программа стабилизации технологических параметров обработки зубчатых реек за счет изменения среднеквадратичной интегральной функции для расчета оптимального угла рассогласования (см. приложение Б) и проведены математические расчеты на ЭВМ для использования в практике разработки технологического обеспечения параметров обработки дисковыми зуборезными фрезами при предварительном и окончательном формообразовании зубчатых изделий.

Оптимизация технологического обеспечения геометрических параметров состояния поверхностного слоя при профильном формообразовании зубьев колес и реек осуществляется по углу рассогласования $\beta_{опт}$, соответствующего наименьшему значению среднеквадратичного отклонения параметра интегральной функции от ее среднего значения.

Для зубчатой рейки тяжелого токарного станка мод.1К670Ф3 :

Модуль $m = 10$ мм, угол исходного профиля $\alpha = 20^\circ$, размеры сечения рейки 100x80мм, длина рейки 800мм, степень точности 7-В ГОСТ10242-81. Инструмент: сталь P6M5, диаметр фрезы $D = 285$ мм, число зубьев фрезы $Z = 12$.

Режимы резания: скорость резания $V = 20$ м/мин, минутная подача $S_{мин} = 40$ мм/мин, предварительное нарезание профиля зубьев с припуском 0,8мм по хорде толщины зуба на измерительной высоте, обрабатываемый материал сталь АЦ40Х, заготовка –поковка; термообработка - нормализация НВ 176...217, коэффициенты, входящие в формулу определения силы резания, $C_1 = 68,2$, $k = 0,72$ [].

$$P_1 = f(S_2; C_1; A_1; A_2, A_3, \Delta, \psi_{max}, k, R, m, \lambda),$$

Где

$$\psi_{max} = \arccos \left(1 - \frac{2.25 \cdot m}{R} \right) = \arccos \left(1 - \frac{2.25 \cdot 10}{145} \right) = 32^\circ 24'$$

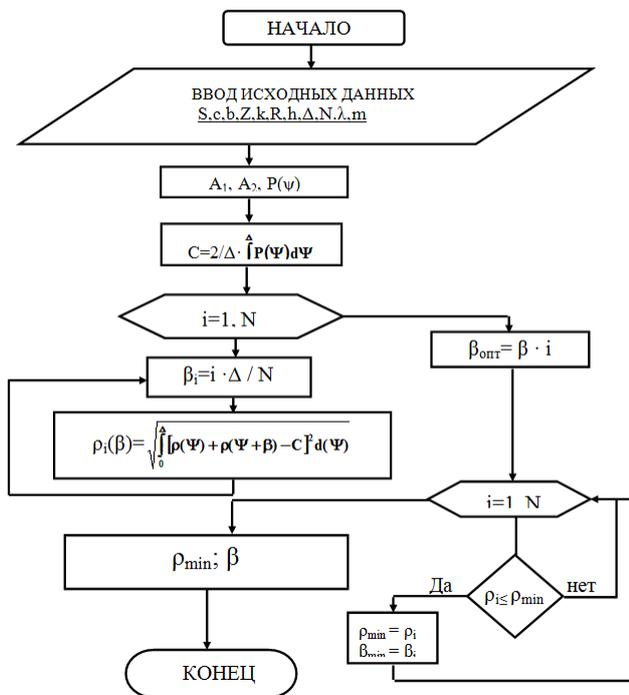


Рис. 4 – Блок-схема алгоритма нахождения оптимального значения угла рассогласования $\beta_{опт}$ и минимального значения расстояния между интегральными функциями среднеквадратичного отклонения ρ_{min}

На базе алгоритма нахождения наименьшего значения расстояния ρ_{min} между функциями среднеквадратичного отклонения $P_{общ}$ от постоянной $C(5)$ в интервале изменения β от $0^0 \leq \beta \leq 30^0$ ($i=1,2,3-20$) с шагом $h = \frac{30^0}{20} = 1,5^0$ выбирается наименьшее ρ_{min} , которое соответствует оптимуму угла рассогласования $\beta_{опт}$.

Оптимальный угол рассогласования $\beta_{опт}$, отвечающий минимальному значению расстояния между интегральными функциями среднеквадратичного отклонения $P_{общ}$ от постоянной C .

Результаты счета для конкретного примера при $\Delta = 30^0$, наибольшем угле контакта $\Psi_{max} = 32^0 24'$, $S_m = 40 \text{ мм/мин}$, $V = 20 \text{ м/мин}$, $D = 2R = 290 \text{ мм}$, $\rho_{min} = 2,76788$, $\beta_{опт} = 19^0 30'$. Оптимальный параметр угла рассогласования $\beta_{опт}$, отвечающий максимальной стационарности сил резания, $\beta_{опт} = 19^0 30'$ - единственный.

При использовании трех- и четырехрядных дисковых зуборезных фрез угол между зубьями соседних фрез также рассчитывается по разработанной методике.

Стабилизация процесса формообразования моделирует математическую зависимость изменения положения режущей кромки зуба фрезы с обеспечением постоянной мгновенной площади (F_i) сечения срезаемого слоя на длине дуги резания.

Математическая модель траектории движения

зуба фрезы позволяет определить мгновенную площадь сечения срезаемого слоя и установить параметры стабилизации процесса формообразования.

Рассмотрим вывод формулы траектории движения зуба фрезы. Для нахождения длины пути L_i каждой точки режущего лезвия выберем систему координат, как показано на рис. 5.

Движение каждой точки режущей кромки фрезы складывается из вращательного движения вокруг оси ou с угловой скоростью ω и поступательного перемещения вдоль оси oz с минутной подачей $S_{мин}$.

Отдельно опишем поверхности, полученные при движении отрезков AB и BC . При повороте на угол Ψ_i вокруг оси ou координаты точки A

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \Psi_i \\ Z = R \cdot \sin \Psi_i \end{cases}$$

после перемещения вдоль оси oz на расстояние a

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \Psi_i \\ Z = R \cdot \sin \Psi_i + a \end{cases}$$

где $\Psi_i = \omega \cdot t$, $a = S_{мин} \cdot t$.

Таким образом, поверхность, полученная движением отрезка AB , имеет следующее параметрическое уравнение

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \omega \cdot t \\ Z = R \cdot \sin \omega \cdot t + S_{мин} \cdot t \end{cases}$$

т.е.

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \Psi_i \\ Z = R \cdot \sin \Psi_i + \frac{S_{мин}}{\omega} \cdot \Psi_i \end{cases}$$

Выразим математически движение, описываемое режущими профильными кромками BC зуба фрезы. Обозначим $BF=H$, $CF=B$, $\text{tg} \alpha = B/H = \lambda_i$, $AB=\Delta$.

После поворота на угол Ψ_i вокруг оси ou координата точки B

$$B(R \cdot \cos \Psi_i, \Delta, R \cdot \sin \Psi_i).$$

Координата точки C

$$C((R-H) \cdot \cos \Psi_i, (\Delta+B), (R-H) \cdot \sin \Psi_i).$$

Выберем единичный вектор, параллельный BC , учитывая, что направляющий вектор прямой BC равен

$$(-H \cdot \cos \Psi_i, B, -H \cdot \sin \Psi_i),$$

тогда

$$I_0 = \left(-\frac{\cos \psi_i}{\sqrt{1+\lambda^2}} = \gamma_1, \frac{X}{\sqrt{1+\lambda^2}} = \gamma_2, -\frac{\sin \psi_i}{\sqrt{1+\lambda^2}} = \gamma_3 \right).$$

После перемещения вдоль оси oz на расстояние a координата точки B

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \Psi_i \\ Y = \Delta \\ Z = R \cdot \sin \Psi_i + a \end{cases}$$

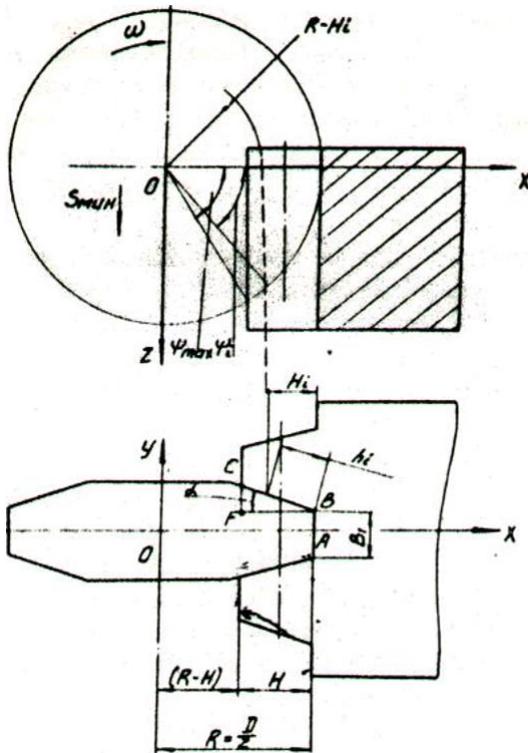


Рис. 5 – Система координат формообразования рабочих поверхностей зубьев: оу – координатная ось совпадает с осью вращения дисковой фрезы; оз - координатная ось соответствует направлению подачи фрезы.

Уравнение прямой выразится

$$\frac{X - R \cdot \cos \psi_i}{\gamma_1} = \frac{Y - \Delta}{\gamma_2} = \frac{Z - (R \cdot \sin \psi_i + a)}{\gamma_3} = h_i.$$

Параметрические уравнения поверхности при движении отрезка АВ ВС имеют вид

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \omega \cdot t + h_i \cdot \gamma_1 = \cos \Psi_i \cdot \left(R - \frac{h_i}{\sqrt{1 - \lambda_i^2}} \right) = \cos \Psi_i \cdot B_2 \\ Y = \Delta + h_i \cdot \gamma_2 = \Delta + X \cdot B_2 \\ Z = R \cdot \sin \omega \cdot t + S_{\text{мин}} \cdot t + h_i \cdot \gamma_3 = \sin \Psi_i \cdot \left(R - \frac{h_i}{\sqrt{1 - \lambda_i^2}} \right) + \frac{S_{\text{мин}}}{\omega} \cdot \Psi_i \end{cases}$$

$$Z' = \cos \Psi_i \cdot B_2 + \frac{S_{\text{мин}}}{\omega}$$

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \Psi_i \\ Y = R \cdot \sin \Psi_i + \frac{S_{\text{мин}}}{\omega} \cdot \Psi_i \end{cases} \begin{cases} X' = R \cdot \sin \Psi_i \\ Y' = R \cdot \cos \Psi_i + \frac{S_{\text{мин}}}{\omega} \end{cases}$$

На рис. 5 угол контакта фрезы Ψ_{max} , соответствующий

длинне дуги контакта с обрабатываемым профилем зуба определяется по формуле

$$\Psi_{\text{max}} = \arccos \frac{R - H}{R} = \arccos \left(1 - \frac{H}{R} \right).$$

В общем виде длина дуги контакта с обрабатываемым профилем зуба определится по формуле

$$L = \int_0^{\Psi_{\text{max}}} \sqrt{X'^2 + Y'^2} \cdot d\psi$$

$$L = \int_0^{\Psi_{\text{max}}} \sqrt{R^2 \cdot \sin^2 \psi + R^2 \cdot \cos^2 \psi + 2 \cdot R \cdot \frac{S_{\text{мин}}}{\omega} \cdot \cos \psi + \frac{S_{\text{мин}}^2}{\omega^2}} \cdot d\psi$$

После преобразования получим

$$L = R \cdot \psi_{\text{max}} + \frac{S_{\text{мин}}}{\omega} \cdot \sin \psi_{\text{max}}, \quad (7)$$

где $S_{\text{мин}} = S_0 \cdot n = Z \cdot S_z \cdot n = S_z \cdot Z \cdot (1000 \cdot V / \pi \cdot D)$, $\omega = 1000 \cdot V / 30$, рад/с. Тогда

$$\frac{S_{\text{мин}}}{\omega} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot S_z \cdot Z.$$

Значение текущего угла, соответствующего положению режущих кромок формообразующих зубьев фрезы

$$\Psi_i = \arccos \frac{R - H}{R'} = \arccos \left(\frac{R - H}{R - H_i} \right),$$

$$H_i = \frac{h_i}{\sqrt{1 + \lambda_i^2}}.$$

При рассмотрении изменения длины пути каждой точки режущего лезвия зуба фрезы L_i в зависимости от угла поворота фрезы в пределах $\Psi_i \Big|_0^{\Psi_{\text{max}}}$

в формулу (7) вместо R подставим значение $B_2 = R - H_i$, тогда

$$L_i = B_2 \cdot \psi_i + \frac{S_{\text{мин}}}{\omega} \cdot \sin \psi_i = (R - H_i) \cdot \psi_i + \frac{S_{\text{мин}}}{\omega} \cdot \sin \psi_i.$$

С учетом перерасчета радиального измерения в градусное уравнение изменения положения каждой точки зуба фрезы, участвующего в формообразовании примет вид, удобный для практических расчетов

$$L_i = 0,017453 \cdot \left[\left(\frac{D}{2} - H_i \right) \cdot \psi_i^0 + 8,386555 \cdot S_z \cdot Z \cdot \sin \psi_i^0 \right],$$

где при угле наклона передней поверхности зуба фрезы

$$\lambda = 0^0, \text{ при } \lambda \neq 0^0$$

$$\mathbf{H}_i \begin{cases} \mathbf{H} = 2,25 \cdot \mathbf{m} \\ 0 \end{cases}, \quad \mathbf{H}'_i = \frac{\mathbf{H}_i}{\cos \lambda}$$

Подставляя в формулу определения толщины [1, 4] срезаемого слоя параметры процесса формообразования, получаем математическое моделирование для синтеза технологических параметров операции зубонарезания реек спаренными фрезами.

$$a_i = S_z \cdot \sin \Psi_i \cdot \sin \alpha_s \quad (9)$$

где α_s – угол профиля фрезы в рассматриваемой точке режущего лезвия.

Мгновенная площадь срезаемого слоя при изменении траектории движения режущего лезвия L_i (8) по боковым профилям $F_{np} = a_i \cdot H_i \cdot (1 + \lambda^2 i)^{1/2}$, по впадине $F_{np} = a_i \cdot m \cdot (\pi/2 - 2 \cdot \text{tg} \alpha)$. Суммарная мгновенная площадь срезаемого слоя

$$F_i = \sum_0^{L_i} (2 \cdot F_{np} + F_{вп})$$

В общем виде мгновенная сила резания P_{zi} при формообразовании рабочих профилей зубьев реек рассчитывается по формуле

$$P_{zi} = C_1 \cdot F_i \cdot a_i^k,$$

где C_1 , k – коэффициенты, учитывающие свойства обрабатываемого материала.

Значения текущего угла контакта Ψ_i , режимов резания, длины пути контакта L_i , физико-механических свойств обрабатываемого материала позволяют произвести расчет при фиксированном положении режущего лезвия параметров обрабатываемых поверхностей и состояния качества режущего инструмента, что также предопределяет состояние поверхностного слоя зубчатых реек.

Характер изменения мгновенных параметров формообразования для определенных условий обработки определяет параметры стабилизации и возможность управлением качеством и точностью поверхностного слоя зубчатых реек.

Выводы. Приведены аналитические зависимости для определения мгновенной площади сечения срезаемого слоя и установлены параметры стабилизации процесса формообразования. Теоретически доказано, что характер изменения мгновенных параметров формообразования для определенных условий обработки определяет параметры стабилизации и возможность управлением качеством и точностью поверхностного слоя зубчатых реек.

Список літератури

1. А. с. 1729705 СССР, МКИ В23 F 5/20. Способ фрезерования зубчатых изделий спаренными фрезами / А. А. Клочко, В. Н. Бородаевский, О. А. Богатырев, В. И. Баран (СССР). – № 4736585/08; заявл. 11.09.89; опубл. 30.04.92, Бюл. № 16. – 4 с. :

- ил.
2. Клочко, А. А. Физическая картина эффективности прогрессивных схем зубофрезерования / А. А. Клочко // Передовой производственный опыт и научнотехнические достижения : информ. сборник. – М. :ВНИИТЭМР, 1990. – Вып. 8. – С. 12–13.
3. Перспективные работы по созданию методов и средств контроля высокоточных зубчатых реек в условиях тяжелого машиностроения и станкостроения / А. А. Клочко, В. И. Печеный, В. А. Вышлов, В. И. Завгородний // Передовой производственный опыт и научно-технические достижения: информ. сб. – М. : ВНИИТЭМР, 1989. – Вып. 6. – С. 1–2.
4. Новые технологические направления чистовой обработки зубчатых реек / А. А. Клочко, Н. И. Зиновьев, Ю. А. Клочко, Е. В. Мироненко // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. ХДПУ. – Харків, 2000. – Вип. 1(3). – С. 138–145.
5. Научное обоснование технологических методов обеспечения эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. И. Волошин, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Н. Кравцов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 30. – С. 194–204.
6. Методика расчета параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес в зависимости от условий их обработки / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, Д. В. Ефремов, А. А. Клиновский // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 157–173.
7. Исследование влияния параметров волнистости на эксплуатационные свойства цилиндрических крупномодульных зубчатых колес / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Н. Шелковой, А. А. Ярошенко, С. Ю. Палашек // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2014. – Вып. 34. – С. 19–25.

Bibliography (transliterated)

1. A. with. 1729705 USSR, MKI V23 F 5 / 20. Method of milling gear products with twin milling cutters / AA Klochko, VN Borodaevsky, OA Bogatyrev, VI Baran (USSR). - No. 4736585/08; Claimed. 11.09.89; Publ. 30.04.92, Bul. № 16. - 4 with. : III.
2. Klochko, AA A physical picture of the effectiveness of progressive schemes of gear milling / AA Klochko // Advanced industrial experience and scientific and technical achievements: inform. Compilation. - M.: VNIITEMR, 1990. - Issue. 8. - P. 12-13.
3. Perspective work on the development of methods and means for controlling high-precision gear racks in the conditions of heavy engineering and machine-tool construction / A. A. Klochko, V. I. Pechenyi, V. A. Vyshlov, V. I. Zavgorodni // Advanced industrial experience and scientific -technical achievements: inform. Sat. - M.: VNIITEMR, 1989. - Issue. 6. - C. 1-2.
4. New technological directions of finishing processing of cogged rails / AA Klochko, NI Zinoviev, Yu. A. Klochko, EV Mironenko // Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: zb. Sciences. Pr. KhPPU. - Kharkiv, 2000. - Vip. 1 (3). -FROM. 138-145.
5. Scientific substantiation of technological methods for ensuring the operational properties of hardened coarse-grained cogwheels / Yu. V. Timofeev, AI Voloshin, EV Mironenko, AA Klochko, AN Kravtsov // Instrument reliability and optimization of technological Systems: Sat. Sci. Tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Issue. 30. - P. 194-204.
6. Methods for calculating the parameters of the state of the surface layer of quenched coarse-grained gears, depending on the processing conditions / AN Shelkova, EV Mironenko, AA Klochko, DV Efremov, AA Klinovskii // Tool reliability and optimization of technological systems: Sat. Sci. Tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Issue. 31. - P. 157-173.
7. Investigation of the influence of ripple parameters on the operational properties of cylindrical coarse-grained cogwheels / E.V. Mironenko, A.A. Klochko, A.N. Shelkova, A.A. Yaroshenko, S.Yu. Palashek // Instrument reliability and optimization of technological systems: Sat. Sci. Tr. - Krama-Torsk: DGMA, 2014. - Issue. 34. - P. 19-25.

Поступила (received) 12.04.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Синтез технологічних параметрів високопродуктивної обробки зубчастих рейок спареними фрезами / О.А. Пермяков, О.О. Клочко, Ю.О. Синица // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 71–77. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Синтез технологических параметров высокопроизводительной обработки зубчатых реек спаренными фрезами / А.А. Пермяков, А.А. Клочко, Ю.А. Синица // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 71–77. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Synthesis of technological parameters of high-performance processing of toothed racks by twin milling cutters / A. Permyakov, A. Klochko, Yu. Sinitsa // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.71–77. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пермяков Олександр Анатолійович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: perm_a@i.ua;

Пермяков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры технологии машиностроения и металлорежущих станков; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: perm_a@i.ua;

Permyakov Oleksandr Anatoliyovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor at the Department of engineering technology and machine tools; tel.: (057)-720-66-25, e-mail: perm_a@i.ua;

Клочко Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: klochko21@rambler.ru;

Клочко Александр Александрович – доктор технических наук, профессор, кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: klochko21@rambler.ru;

Klochko Alexander Alexandrovich - Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Department of Mechanical Engineering Technology and machine tools of the National Technical University "Kharkiv politechnichemkty Institute " Kharkiv; tel.: (067) 936-36-64; e mail: klochko21@rambler.ru;

Синица Юрій Олександрович – магістр кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (063) 656-75-16;

Синица Юрий Александрович – магістр кафедри технологія машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; (063) 656-75-16;

Sinitsa Yuriy Oleksandrovich - magistre of the chair of the technology of machine-building and meteorological station of the National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute y" Kharkiv; Tel.: (063) 656-75-16.