УДК 621.7.01

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ

© 2026 А.В. Алексеев

Приволжский государственный университет путей сообщения, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 12.03.2026

Основным способом изготовления зубчатых колес в серийном производстве является обкатка – механическая обработка металлических заготовок на специальных станках с применением зуборезного инструмента: инструментальной рейки, долбяка или червячной фрезы. При таком способе изготовления, инструмент и заготовка совершают относительное движение, аналогичное реальному зацеплению: реечному, зубчатому или червячному. Кроме того, инструменту дополнительно сообщается технологическое движение (движение резания), которое формирует впадины между зубьями нарезаемого колеса за счет снятия материала (стружки) с заготовки. Для каждого зуба нарезаемого колеса, эвольвентный профиль получается как огибающая профиля инструмента в нескольких последовательных его положениях. То есть в процессе резания инструмент как бы обкатывается относительно оси заготовки. Недостатками существующих технологий нарезания зубчатых колес являются низкая производительность рабочего процесса и неточность эвольвентного профиля зубьев. Приведенные недостатки объясняются сложностью кинематики станочного зацепления инструмента и заготовки, а также несовершенством станочного оборудования и зубообрабатывающего инструмента. Наибольшие перспективы для совершенствования, ввиду наилучших эксплуатационных показателей, имеет зуборезный инструмент, выполненный в виде многозаходной червячной фрезы. Целью настоящих исследований является повышение эффективности процесса зубофрезерования, за счет совершенствования конструкции и выбора рациональных геометрических параметров многозаходных червячных фрез. Автором проанализированы аналитические выражения, устанавливающие характер влияния технологических параметров процесса зубофрезерования, а также конструктивных и геометрических параметров червячных фрез на производительность рабочего процесса и качество механической обработки заготовок. На основе проведенных теоретических исследований разработаны практические рекомендации по выбору рациональных значений геометрических параметров усовершенствованной конструкции многозаходной червячной фрезы, обладающей высокими эксплуатационными свойствами. Применение усовершенствованных фрез на машиностроительных предприятиях позволит значительно повысить производительность зубофрезерования и качество механической обработки зубьев.

Ключевые слова: нарезание зубчатых колес; метод обкатки; зубофрезерование; многозаходная червячная фреза; производительность зубофрезерования; качество обработки профиля зубьев.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-4-18-25
EDN: EPZNGR

ВВЕДЕНИЕ

Зубчатые передачи – основной вид передач, широко применяемый в современных машинах. Назначение зубчатых передач, как и любого другого вида передаточных механизмов, – согласование кинематических и силовых параметров двигателя с исполнительным (рабочим) органом машины.

Зубчатые колёса являются подвижными звеньями, образующими зубчатые передачи. В современной России ежегодная потребность машиностроения в зубчатых колёсах исчисляется десятками миллионов штук. Зубчатые колеса устанавливаются в редукторах, мультипликаторах, трансмиссиях автомобилей и тракторов, а также в приводах станков и промышленного оборудования [1, 2].

Производство зубчатых колес тесно связано с рядом важнейших отраслей машиностроения России: станкостроение, автомобилестроение, тракторостроение, аэрокосмическая промышленность; подъемно-транспортное и сельскохозяйственное машиностроение и т. д.

Основным способом изготовления зубчатых колес в серийном производстве является обкатка – механическая обработка (резание) металлических заготовок на специальных станках с применением зуборезного инструмента, выполненного в виде инструментальной рейки, долбяка или червячной фрезы.

При таком способе изготовления, инструмент и заготовка совершают относительное движение, аналогичное реальному зацеплению: реечному, зубчатому или червячному. Кроме того, инструменту дополнительно сообщается движение резания, которое формирует впадины между зубьями нарезаемого колеса за счет снятия материала (стружки) с заготовки.

Алексеев Антон Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика». E-mail: antonvladim@mail.ru

Для каждого зуба нарезаемого колеса, эвольвентный профиль получается как огибающая профиля инструмента в нескольких последовательных его положениях. То есть в процессе резания инструмент как бы обкатывается относительно оси заготовки.

Несмотря на столь значительный объем выпуска зубчатых колес, технологии их изготовления имеют ряд недостатков, снижающих эффективность процесса нарезания.

Основным недостатком является низкая производительность рабочего процесса, в сравнении с другими видами механической обработки металлов с применением скоростного и силового резания. Существующие технологии изготовления зубчатых колес не обеспечивают высокую точность эвольвентного профиля зубьев и постоянство их шага по делительной окружности [3–7].

Приведенные недостатки объясняются особенностями кинематики станочного зацепления инструмента и заготовки, сложностью технологического процесса (станочного оборудования), а также несовершенством зубообрабатывающего инструмента, в том числе фрез с твердосплавными режущими кромками.

Наибольшие перспективы для совершенствования, вследствие наилучших эксплуатационных показателей (производительность процесса, стойкость, качество обработки профиля зубьев), имеет зуборезный инструмент, выполненный в виде многозаходной червячной фрезы.

Целью настоящих исследований является повышение эффективности процесса зубофрезерования, за счет совершенствования конструкции и выбора рациональных геометрических параметров многозаходных червячных фрез.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим вначале известные аналитические зависимости, характеризующие процесс зубофрезерования (рис. 1) [8, 9].

Машинное время зубофрезерования определяется по формуле, с

$$T_M = \frac{b+\delta}{S_0 n_к}\ , \tag{1}$$

где b – длина зуба, м;

δ – величина врезания, м;

$n_к$ – частота вращения нарезаемого колеса, об/с;

S_0 – осевая подача инструмента, м/об.

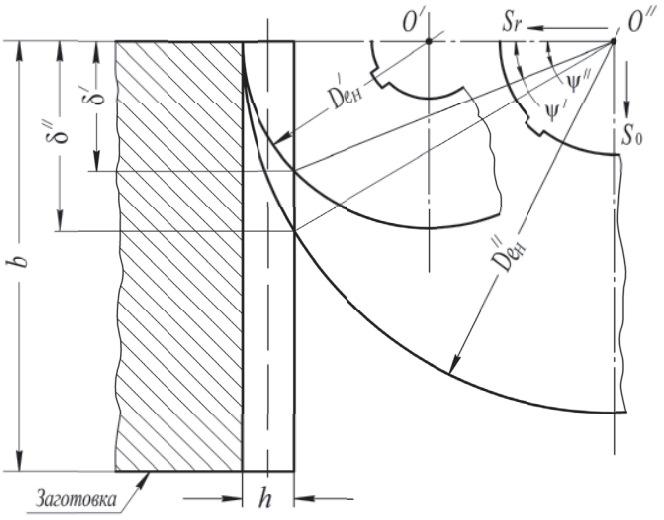

Рис. 1. Расчетная схема определения осевого и радиального врезания при зубофрезеровании:

$D'_{ен}$, $D''_{ен}$ – диаметры червячных фрез;

h – высота зуба нарезаемого колеса;

δ', δ'' – величины осевого врезания фрезы;

S_0 – направление осевой подачи;

S_r – направление радиального врезания;

b – длина зуба колеса (ширина зубчатого венца колеса);

$\delta' = \delta' = h$ – величина радиального врезания фрезы

Анализ выражения (1) показывает, что уменьшение машинного времени T_M возможно за счет уменьшения значений параметров *b* и δ, а также за счет увеличения величины S_0. Длина зуба *b* зависит от конструкции колеса, поэтому ее можно считать константой: $b = \text{const}$.

Величина осевого врезания δ находится в зависимости от диаметра фрезы $D_{\text{ен}}$ и рассчитывается по формуле

$$\delta = \sqrt{h\left(D_{\text{ен}} - h\right)}\,, \tag{2}$$

где $D_{\text{ен}}$ – диаметр фрезы, м;

h – высота зуба нарезаемого колеса. Величина *h* характеризует конструкцию колеса, поэтому ее, как и параметр *b*, можно считать постоянной: $h = \text{const}$.

Из формулы (2) следует, что уменьшение величины δ может быть достигнуто за счет применения фрез меньшего диаметра $D_{\text{ен}}$. Однако уменьшение $D_{\text{ен}}$ ограничено минимально допустимой жесткостью системы «станок-приспособление-инструмент-деталь».

В формуле (1) частота вращения $n_{\text{к}}$ нарезаемого колеса определяется по формуле, об/с

$$n_{\text{к}} = n_{\text{ф}}\frac{Z_{\text{зах}}}{Z_{\text{к}}} = \frac{VZ_{\text{зах}}}{\pi D_{\text{ен}} Z_{\text{к}}}\,, \tag{3}$$

где $n_{\text{ф}}$ – частота вращения фрезы, об/с;

V – скорость резания, м/с;

$Z_{\text{к}}$ – число зубьев нарезаемого колеса;

$Z_{\text{зах}}$ – число заходов фрезы.

Учитывая выражения (1), (3), получим, с

$$T_M = \frac{(b+\delta)\pi D_{\text{ен}} Z_{\text{к}}}{1000 V S_0 Z_{\text{зах}}}\,, \tag{4}$$

Анализ формулы (4) показывает, что уменьшение времени T_M, при постоянных значениях $Z_{\text{к}}$, *b*, $D_{\text{ен}}$, δ, возможно за счет увеличения скорости резания *V*, увеличения осевой подачи S_0, а также за счет увеличения числа заходов фрезы $Z_{\text{зах}}$.

Увеличение скорости резания *V*, как следует из формулы (3), возможно за счет увеличения частоты вращения $n_{\text{ф}}$. Это требует применения дорогостоящих фрез из твердосплавных материалов или качественных марок быстрорежущей стали. Увеличение $n_{\text{ф}}$ также возможно за счет внесения изменений в используемые на станке методы и средства охлаждения в зоне резания заготовки.

В настоящее время одним из основных путей повышения производительности зубофрезерования (уменьшения времени T_M) является увеличение осевой подачи S_0 инструмента.

Однако чрезмерное повышение S_0 вызывает неравномерность загрузки и чрезмерный износ зубьев фрезы. Известно, что наиболее загруженными являют 3 – 4 зуба фрезы, которые первыми входят в зацепление с заготовкой. Характер работы этих зубьев регламентирует величину осевой подачи S_0 при зубофрезеровании [10].

Чрезмерное увеличение S_0 вызывает также вибрацию технологической системы «станок – приспособление – инструмент – деталь», снижает качество обработки боковой поверхности зубьев (отклонение от эвольвентной формы), а также способствует преждевременному износу (затуплению) рабочих кромок зубьев фрезы и может вызвать их поломку.

Различают следующие обработочные неровности зубьев: огранка профиля *f*, волнистость зуба по боковой поверхности $f_{\text{Б}}$, волнистость по впадине f_i зубьев (рис. 2).

Увеличение S_0 сопровождается ростом значений указанных обработочных неровностей, а поэтому не может рассматриваться способом повышения эффективности процесса зубофрезерования. Следовательно, для заметного увеличения осевой подачи S_0, требуются внесения изменения в конструкцию и геометрические параметры существующих фрез.

Например, некоторого увеличения значения S_0, при сохранении значений $f_{\text{Б}}$ и f_i, можно достигнуть путем уменьшения профильного угла $\alpha_{\text{Д}}$ исходной рейки [11, 12].

Формула волнистости зуба по его боковой поверхности имеет вид, м

$$f_{\text{Б}} = \frac{S_0^2 \sin\alpha_{\text{Д}}}{4 D_{\text{ен}} \cos^2\beta}\,, \tag{5}$$

где β – угол подъема винтовой линии червячной фрезы;

$\alpha_{\text{Д}}$ – профильный угол исходного контура рейки.

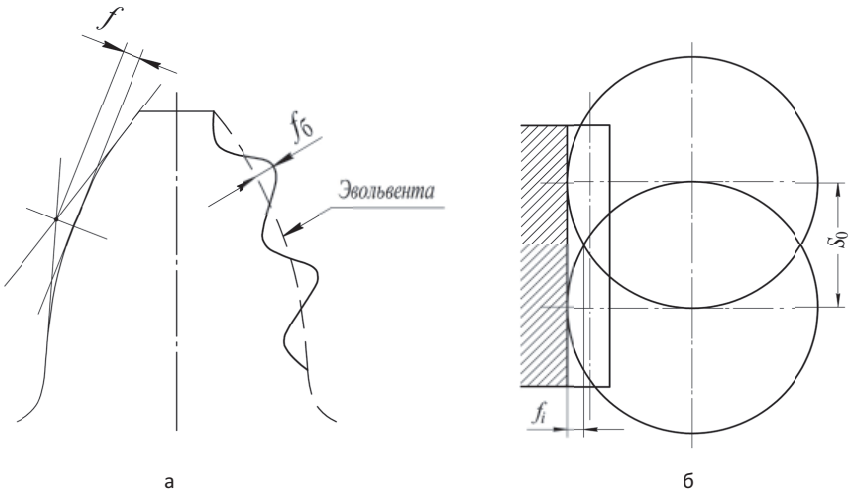

Рис. 2. Обработочные неровности при зубофрезеровании:
а) огранка *f* профиля и волнистость $f_{Б}$ боковой поверхности зубьев;
б) волнистость f_i поверхности впадин зубьев

Следовательно,

$$S_0 = \cos\beta\sqrt{\frac{4D_{ен}f_{Б}}{\sin\alpha_{Д}}}. \qquad (6)$$

Если считать, что фрезерование производится фрезой с постоянной величиной волнистости $f_{Б}$, то можно считать, что $\cos\beta\sqrt{4D_{ен}f_{Б}} = \text{const} = C$. Тогда формула (6) запишется в более простом виде:

$$S_0 = C\sqrt{\frac{1}{\sin\alpha_{Д}}}. \qquad (7)$$

Примем для фрезы с $\alpha_{Д} = 20^{\circ}$ величину осевой подачи S_0 за единицу. В таблице приведены значения отношения S_0/S_0^*, где S_0 – осевая подача фрезы при $\alpha_{Д} = 20^{\circ}$ (формула 7)); S_0^* – осевая подача фрезы при $0 \le \alpha_{Д} \le 20^{0}$ (формула (7)).

Таблица. Расчетные значения подачи S_0 при варьировании профильного угла $\alpha_{Д}$

$\alpha_{Д}$, градусы	20	15	12	10	8	6	3	2	1	0,5	0
S_0/S_0^*	1.00	1.15	1.28	1.40	1.57	1.81	2.56	3.13	4.43	6.28	∞

Анализ табличных значений показывает, что значения отношения S_0/S_0^* становятся значительными только при $\alpha_{Д} = (10 \div 12)^{\circ}$. Однако такое уменьшение $\alpha_{Д}$ влечет резкое уменьшение заднего бокового угла заточки зуба фрезы $\alpha_{Б} = (2 \div 2.5)^{\circ}$, что, в свою очередь, значительно снижает стойкость ее боковых режущих кромок. При этом оптимальное значение угла $\alpha_{Д}$ находится в диапазоне 8°–10°.

Следовательно, червячные фрезы с уменьшенным профильным углом исходного контура рейки не могут применяться для повышения эффективности зубофрезерования.

По мнению автора, наибольшие перспективы для совершенствования имеют многозаходные червячные фрезы. Такие фрезы, в сравнении с однозаходными, имеют бóльшую производительность зубофрезерования. Однако они имеют ряд недостатков.

Так, увеличение числа заходов червячной фрезы, при сохранении постоянного числа зубьев по окружности, вызывает резкое увеличение нагрузки на все ее зубья (особенно на входные зубья). При этом неравномерность процесса зубофрезерования и вибрации в зоне резания возрастают. В результате, снижается стойкость фрезы и качество обработки боковых профилей зубьев нарезаемо-

го колеса. Для устранения этих недостатков, фрезеровщику приходится снижать величину осевой подачи S_0. А это, как следует из формулы (4), вызывает снижение производительности зубофрезерования.

Связь числа заходов червячной фрезы и качества обработки профилей зубьев находят свое подтверждение и при анализе известной формулы для определения величины огранки *f* эвольвентного профиля зуба у делительного диаметра заготовки в сечении, перпендикулярном ее оси [13–15], м

$$f = \frac{\pi^2 Z_{\text{зах}}^2 \sin\alpha_{\text{Д}}}{4 \cdot 10^3 Z_{\text{н}}^2 Z_{\text{к}}}, \quad (8)$$

где $Z_{\text{зах}}$ – число заходов фрезы;

$Z_{\text{н}}$ – число зубьев фрезы.

Формула (8) получена для случая m = 1 мм.

Анализ формулы (8) показывает, что значения *f* возрастают пропорционально квадрату заходов фрезы $Z_{\text{зах}}^2$. Следовательно, известные конструкции многозаходных червячных фрез не обеспечивают стабильно высокую производительность зубофрезерования и высокое качество обработки боковых профилей зубьев нарезаемого колеса, а поэтому требуют совершенствования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние приведенных недостатков может быть заметно уменьшено за счет выбора рациональных геометрических параметров и совершенствования конструкции многозаходных червячных фрез.

Автором, на основе проведенных теоретических исследований, были разработаны практические рекомендации по совершенствованию многозаходных червячных фрез. Критериями оценки эффективности процесса зубофрезерования, при проведении исследований, были производительность рабочего процесса и качество обработки боковых поверхностей зубьев колеса (минимизация значений величин f, $f_{\text{Б}}$ и f_i).

Для обоснования рациональных геометрических параметров усовершенствованной червячной фрезы вновь обратимся к приведенным ранее аналитическим зависимостям.

Анализ формулы (4) показывает, что машинное время T_M зубофрезерования, при сохранении неизменными значений величин b, δ, $Z_{\text{к}}$, $Z_{\text{зах}}$, S_0, V, прямо пропорционально диаметру фрезы $D_{\text{ен}}$. То есть с увеличением диаметра фрезы $D_{\text{ен}}$ во столько же раз увеличивается машинное время T_M. При этом, если диаметр фрезы $D_{\text{ен}}$ увеличить в целое число раз (например, в 2, 3, 4 раза) и в это же число раз увеличить и число заходов фрезы ($Z_{\text{зах}} = 2,\ 3,\ 4$ раза), то машинное время T_M останется без изменения.

Однако увеличение диаметра $D_{\text{ен}}$ фрезы влечет за собой примерно пропорциональное возрастание числа ее зубьев. При одинаковой величине осевой подачи фрезы на один зуб, подача S_0 на полный оборот фрезы увеличенного диаметра, по сравнению со стандартной фрезой, будет значительно выше. А это, в свою очередь, ведет к уменьшению машинного времени T_M, то есть повышает производительность зубофрезерования [16].

Величина диаметра $D_{\text{ен}}$ фрезы, как следует из формулы (2), связана прямой зависимостью с величиной осевого врезания δ фрезы. Для уменьшения δ, зубофрезерование необходимо проводить, не осевым, а радиальным врезанием фрезы. В этом случае справедливо равенство $\delta = h$, то есть величина врезания равна высоте зуба нарезаемого колеса и не зависит от диаметра фрезы $D_{\text{ен}}$ (рис. 1).

Таким образом, значительное увеличение диаметра фрезы (в 2 – 5 раз), применение многозаходности ($Z_{\text{зах}} = 2 \div 5$) и радиальной подачи инструмента при врезании открывают широкие возможности повышения производительности зубофрезерования.

Например, для червячной фрезы с модулем m = 5 мм, увеличение диаметра с $D_{\text{ен}} = 0{,}112$ м до $D_{\text{ен}} = 0{,}336$ м при соответствующем увеличении числа заходов с $Z_{\text{зах}} = 1$ до $Z_{\text{зах}} = 3$ может обеспечить повышение производительности процесса примерно в 2 раза.

Теперь рассмотрим, как предлагаемые автором изменения геометрических параметров фрезы влияют на качество обработки бокового профиля зубьев.

Из формулы (8) следует, что величина огранки *f* пропорциональна квадрату числа заходов фрезы $Z_{\text{зах}}^2$ и обратно пропорциональна квадрату числа ее зубьев $Z_{\text{н}}^2$, при сохранении постоянными значений параметров $Z_{\text{к}}$, $\alpha_{\text{Д}}$. Следовательно, применение опытной червячной фрезы увеличенного диаметра $D_{\text{ен}}$, с соответствующим пропорциональным увеличением $Z_{\text{зах}}$ и $Z_{\text{н}}$, не будет практически влиять на величину огранки *f* профиля зубьев нарезаемого колеса.

Анализ формулы (5) показывает, что увеличение $D_{ен}$ уменьшает волнистость $f_Б$ зубьев по боковой поверхности. Это позволяет увеличить величину осевой подачи S_0, при сохранении или даже снижении величины $f_Б$.

Если считать постоянными значения параметров β, $f_Б$ и $\alpha_Д$, то в формуле (6) можно принять $C = \cos\beta\sqrt{\frac{4f_Б}{\sin\alpha_Д}} = \text{const}$ и записать ее в более простом виде:

$$S_0 = C\sqrt{D_{ен}}\ . \tag{9}$$

Из формулы (9) следует, что при заданной величине $f_Б$, осевая подача S_0 фрезы может быть увеличена в $\sqrt{D_{ен}}$ раз.

Волнистость f_i поверхности впадин зубьев, также как и величина $f_Б$, зависит от осевой подачи S_0 и диаметра $D_{ен}$ червячной фрезы, что следует из известной аналитической зависимости [17]:

$$f_i = \frac{S_0^2}{4D_{ен}\cos^2\gamma}, \tag{10}$$

откуда

$$S_0 = \sqrt{4D_{ен}f_i\cos^2\gamma}, \tag{11}$$

где γ – угол наклона зубьев нарезаемого колеса.

Анализ формулы (10) показывает, что увеличение $D_{ен}$ уменьшает волнистость f_i зубьев по поверхности впадин. Это, как и в случае с $f_Б$, позволяет увеличить значение S_0, при сохранении или даже снижении величины f_i.

Введя в формулу (11) константу $C_1 = \sqrt{4f_i\cos^2\gamma} = \text{const}$, запишем

$$S_0 = C_1\sqrt{D_{ен}}\ . \tag{12}$$

Следовательно, при заданных значениях f_i, $f_Б$, осевая подача S_0 фрезы может быть увеличена в $\sqrt{D_{ен}}$ раз. В случае пониженных требований по величинам $f_Б$ и f_i, осевая подача S_0 фрезы может быть увеличена еще больше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам теоретических исследований автором разработаны практические рекомендации по выбору рациональных значений геометрических параметров усовершенствованной конструкции многозаходной червячной фрезы, обладающей высокими эксплуатационными свойствами.

Предлагаемое автором техническое решение, при реализации в производство, целесообразно выполнять в виде сборной конструкции со вставными режущими гребенками. Последние лучше проковываются, что увеличивает их стойкость.

Усовершенствованная автором конструкция червячной фрезы, как и применяемые в настоящее время одно- и многозаходные аналоги, может быть стандартизирована. Это позволит сократить типоразмеры выпускаемых фрез, **а также снизить сроки их проектирования и изготовления. Кроме того, стандартизация** обеспечит взаимозаменяемость образующих фрезу элементов (деталей), упростит их ремонт и обслуживание, а также позволит использовать стандартный режущий и измерительный инструмент при изготовлении и ремонте.

К достоинствам предлагаемой червячной фрезы также относятся возможность осевой передвижки вдоль оси вращения (в целях **выравнивания износа ее зубьев)**, повышенная стойкость (ввиду увеличения жесткости системы «станок – приспособление – инструмент – деталь»), улучшенное охлаждение зубьев фрезы (они более продолжительное время находятся вне зоны резания), а также повышенная плавность процесса зубофрезерования.

Задачами дальнейших исследований является конструктивная проработка предлагаемой фрезы, а также изучение кинематики и динамики процесса зубофрезерования. Для этого требуется проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Подводя итог выполненных исследований, можно сделать следующие выводы:

- применяемые в настоящее время инструменты для нарезания зубчатых колес имеют ряд недостатков, основные из которых низкая производительность рабочего процесса, невысокая точность эвольвентного профиля нарезаемых зубьев и непостоянство их шага;

- наибольшие перспективы для совершенствования, в качестве инструмента для нарезания зубчатых колес, имеют многозаходные червячные фрезы;

- на основе проведенных теоретических исследований разработаны практические рекомендации по совершенствованию многозаходных червячных фрез;

- применение усовершенствованных многозаходных червячных фрез позволяет значительно повысить производительность зубофрезерования и качество механической обработки зубьев;

- для реализации в производство усовершенствованных фрез требуется проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований, с целью изучения кинематики и динамики процесса зубофрезерования и назначения рациональных конструктивных и геометрических параметров режущих кромок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Полохин, О. В.* Нарезание зубчатых профилей инструментами червячного типа: справочник / О. В. Полохин, А. С. Тарапанов, Г. А. Харламов. – М.: Машиностроение, 2007. – 235 с.
2. *Шуханова, Ж. К.* Зуборезные инструменты / Ж. К. Шуханова, Г. Қ. Шегенова, К. Т. Охапова, З.А. Ибрагимова, А.П. Ивахненко // Вестник науки Южного Казахстана. – 2018. – № 2(2). – С. 42-49.
3. *Забелин, Д. А.* Влияние погрешностей изготовления и сборки зубчатых передач на их кинематическую точность / Д. А. Забелин // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2009. – № 2(23). – С. 78-87. – DOI: 10.53078/20778481_2009_2_78.
4. *Алексеев, А. В.* Повышение срока службы цепных передач / А. В. Алексеев // Вестник машиностроения. – 2025. – Т. 104. – № 2. – С. 100-107. – DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-2-100-107.
5. Медунецкий, В. М. Технологическое обеспечение профильной модификации эвольвентных зубчатых колес в процессе зубофрезерования и шевингования / В. М. Медунецкий // Металлообработка. – 2002. – № 3(9). – С. 6-8.
6. *Голубков, В. А.* Расчет сил, вынуждающих вибрацию в планетарном редукторе / В. А. Голубков, В. Ф. Шишлаков, А. Г. Федоренко, Е. Ю. Ватаева / // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. – № 7. – С. 98-105. – DOI: 10.21778/2218-5453-2019-7-98-105.
7. *Птицын, В. В.* Моделирование процесса зубофрезерования червячными фрезами с нулевым углом профиля / В. В. Птицын, Г. В. Малахов, А. В. Денисов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 218-223.
8. *Алексеев, А. В.* Совершенствование методов уравновешивания роторов сельскохозяйственных машин / А. В. Алексеев // Вестник НГИЭИ. – 2025. – № 2(165). – С. 7-15. – DOI 10.24412/2227-9407-2025-2-7-15.
9. *Хусаинов, Р. М.* Моделирование процесса образования погрешностей зубчатого колеса при зубофрезеровании / Р. М. Хусаинов, Е. Б. Волков // Наука и образование в XXI веке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 34 частях. – Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2013. – С. 147-151.
10. *Николаев, Д. А.* Рациональная величина врезания при радиально-осевом зубофрезеровании колес червячно-модульными фрезами /, Д. А. Николаев, В. В. Демидов // Техника и технологии машиностроения: Материалы IV международной студенческой научно-практической конференции. – Омск: ОмГТУ, 2015. – С. 172-178.
11. *Томашевский, Д. Г.* Оценка волнистости контактирующих поверхностей зубьев крупногабаритных зубчатых передач / Д. Г. Томашевский, В. И. Моисеенко, А. Г. Сидоренко // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Т. 7. – С. 389-392.
12. *Артамонов, Е. В.* Повышение эффективности зубофрезерования путем создания сборных фрез со сменными режущими твердосплавными пластинами / Е. В. Артамонов, В. В. Киреев, В. А. Зырянов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2020. – Т. 24. – № 1. – С. 35-51. – DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-35-51.
13. *Алексеев, А. В.* Определение рациональных параметров мембранного подвеса ротора гироскопа / А. В. Алексеев // Вестник машиностроения. – 2024. – Т. 103. – № 3. – С. 193-196. – DOI 10.36652/0042-4633-2024-103-3-193-196.
14. *Ничков, А. В.* Червячная модульная фреза со сменными твердосплавными или быстрорежущими пластинами / А. В. Ничков, А. Г. Ничков // Технология машиностроения. – 2019. – № 1. – С. 34-36.
15. *Сюборов, В. В.* Сравнение условий резания при зубофрезеровании многозаходной и однозаходной червячной фрезой / В. В. Сюборов // Тезисы докладов 35 научно-технической конференции преподавателей и студентов. – Витебск: ВГТУ, 2002. – С. 23.
16. *Мокрицкий, Б. Я.* К вопросу о путях модернизации зубофрезерного оборудования / Б. Я. Мокрицкий, А. А. Бурков, А. М. Шпилев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2012. Т. 1. – № 10. – С. 56-64.

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE GEAR MILLING PROCESS

© 2026 A.V. Alekseev

Volga State Transport University, Samara, Russia

The main method for manufacturing gears in serial production is rolling – mechanical processing of metal blanks on special machines using gear-cutting tools: a tool rack, a cutter or a worm cutter. With this manufacturing method, the tool and the workpiece perform relative motion similar to a real gear: rack, pinion, or worm. In addition, the tool is additionally given a technological movement (cutting movement), which forms cavities between the teeth of the cut wheel by removing material (chips) from the workpiece. For each tooth of the cut wheel, the involute profile is obtained as the envelope of the tool profile in several consecutive positions. In other words, during the cutting process, the tool rolls around the workpieces axis. The disadvantages of existing gear cutting technologies are low productivity of the work process and inaccuracy of the involute tooth profile. The above mentioned shortcomings are explained by the complexity of the kinematics of the machine engagement of the tool and the workpiece, as well as the imperfection of the machine equipment and gear cutting tool. The gear-cutting tool made in the form of a multi-start worm cutter has the greatest potential for improvement, due to its best performance indicators. The aim of this research is to increase the efficiency of the gear milling process by improving the design and selecting rational geometric parameters of multi-start hobbing cutters. The author analyzed analytical expressions that establish the nature of the influence of technological parameters of the gear milling process, as well as the design and geometric parameters of hobbing cutters on the productivity of the work process and the quality of mechanical processing of workpieces. Based on the conducted theoretical research, practical recommendations have been developed for selecting rational values of geometric parameters of an improved design of a multi-start worm cutter with high performance properties. The use of improved milling cutters in mechanical engineering enterprises will significantly increase the productivity of gear milling and the quality of mechanical processing of teeth.
Key words: cutting of gears; rolling method; gear milling; multi-start hob cutter; gear milling productivity; quality of teeth profile processing.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-4-18-25
EDN: EPZNGR

REFERENCES

1. *Polohin, O. V.* Narezanie zubchatyh profilej instrumentami chervyachnogo tipa: spravochnik / O. V. Polohin, A. S. Tarapanov, G. A. Harlamov. – M.: Mashinostroenie, 2007. – 235 s.
2. *Shuhanova, Zh. K.* Zuboreznye instrumenty / Zh. K. Shuhanova, G. K. Shegenova, K. T. Ohapova, Z.A. Ibragimova, A.P. Ivahnenko // Vestnik nauki Yuzhnogo Kazahstana. – 2018. – № 2(2). – S. 42-49.
3. *Zabelin, D. A.* Vliyanie pogreshnostej izgotovleniya i sborki zubchatyh peredach na ih kinematicheskuyu tochnost' / D. A. Zabelin // Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta. – 2009. – № 2(23). – S. 78-87. – DOI: 10.53078/20778481_2009_2_78.
4. *Alekseev, A. V.* Povyshenie sroka sluzhby cepnyh peredach / A. V. Alekseev // Vestnik mashinostroeniya. – 2025. – T. 104. – № 2. – S. 100-107. – DOI: 10.36652/0042-4633-2025-104-2-100-107.
5. Meduneckij, V. M. Tekhnologicheskoe obespechenie profil'noj modifikacii evol'ventnyh zubchatyh koles v processe zubofrezerovaniya i shevingovaniya / V. M. Meduneckij // Metalloobrabotka. – 2002. – № 3(9). – S. 6-8.
6. *Golubkov, V. A.* Raschet sil, vynuzhdayushchih vibraciyu v planetarnom reduktore / V. A. Golubkov, V. F. Shishlakov, A. G. Fedorenko, E. Yu. Vataeva / // Voprosy radioelektroniki. – 2019. – № 7. – S. 98-105. – DOI: 10.21778/2218-5453-2019-7-98-105.
7. *Pticyn, V. V.* Modelirovanie processa zubofrezerovaniya chervyachnymi frezami s nulevym uglom profilya / V. V. Pticyn, G. V. Malahov, A. V. Denisov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2008. – № 4. – S. 218-223.
8. *Alekseev, A. V.* Sovershenstvovanie metodov uravnoveshivaniya rotorov sel'skohozyajstvennyh mashin / A. V. Alekseev // Vestnik NGIEI. – 2025. – № 2(165). – S. 7-15. – DOI 10.24412/2227-9407-2025-2-7-15.
9. Husainov, R. M. Modelirovanie processa obrazovaniya pogreshnostej zubchatogo kolesa pri zubofrezerovanii / R. M. Husainov, E. B. Volkov // Nauka i obrazovanie v XXI veke: sbornik nauchnyh trudov po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii: v 34 chastyah. – Tambov: OOO \»Konsaltingovaya kompaniya Yukom\», 2013. – S. 147-151.
10. *Nikolaev, D. A.* Racional'naya velichina vrezaniya pri radial'no-osevom zubofrezerovanii koles chervyachno-modul'nymi frezami /, D. A. Nikolaev, V. V. Demidov // Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniya: Materialy IV mezhdunarodnoj studencheskoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – Omsk: OmGTU, 2015. – S. 172-178.
11. *Tomashevskij, D. G.* Ocenka volnistosti kontaktiruyushchih poverhnostej zub'ev krupnogabaritnyh zubchatyh peredach / D. G. Tomashevskij, V. I. Moiseenko, A. G. Sidorenko // Aktual'nye voprosy mashinovedeniya. – 2018. – T. 7. – S. 389-392.
12. *Artamonov, E. V.* Povyshenie effektivnosti zubofrezerovaniya putem sozdaniya sbornyh frez so smennymi rezhushchimi tverdosplavnymi plastinami / E. V. Artamonov, V. V. Kireev, V. A. Zyryanov // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. – 2020. – T. 24. – № 1. – S. 35-51. – DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-35-51.
13. *Alekseev, A. V.* Opredelenie racional'nyh parametrov membrannogo podvesa rotora giroskopa / A. V. Alekseev // Vestnik mashinostroeniya. – 2024. – T. 103. – № 3. – S. 193-196. – DOI 10.36652/0042-4633-2024-103-3-193-196.
14. *Nichkov, A. V.* Chervyachnaya modul'naya freza so smennymi tverdosplavnymi ili bystrorezhushchimi plastinami / A. V. Nichkov, A. G. Nichkov // Tekhnologiya mashinostroeniya. – 2019. – № 1. – S. 34-36.
15. *Syuborov, V. V.* Sravnenie uslovij rezaniya pri zubofrezerovanii mnogozahodnoj i odnozahodnoj chervyachnoj frezoj / V. V. Syuborov // Tezisy dokladov 35 nauchno-tekhnicheskoj konferencii prepodavatelej i studentov. – Vitebsk: VGTU, 2002. – S. 23.
16. *Mokrickij, B. Ya.* K voprosu o putyah modernizacii zubofrezernogo oborudovaniya / B. Ya. Mokrickij, A. A. Burkov, A. M. Shpilev // Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2012. T. 1. – № 10. – S. 56-64.

Anton Alekseev, Candidate of Technics, Associate Professor at the Mechanics and Engineering graphics Department.
E-mail: antonvladim@mail.ru