

СТАНКИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 621.91.04

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

д-р техн. наук, доц. Н.Н. ПОПОК, В.А. ТЕРЕНТЬЕВ
(Полоцкий государственный университет),
канд. техн. наук И.С. ГАУХШТЕЙН
(Институт Белоргстанкинпром, Минск)

Рассматривается проблема совершенствования способов обработки цилиндрических зубчатых колес. Способ формообразующей обработки зубьев представляется в виде системного объекта. Построена системная модель, с максимальной полнотой описывающей способ как системный объект. Систематизируются методы формирования поверхностей зубьев цилиндрических зубчатых колес. Приведены примеры новых высокопроизводительных способов зубообработки, разработанных на основе анализа системной модели синтеза. Представлена математическая модель, имитирующая процесс обработки зубьев зубодолблением при касательном врезании.

Анализ вопроса

Изготовление цилиндрических зубчатых колес имеет ряд особенностей, определяемых тем, что зубчатый венец колес представляет собой сложную для воспроизводства поверхность с эвольвентным профилем. Операция нарезания зубьев в технологическом процессе обработки зубчатого колеса является наиболее сложной, трудоемкой и дорогостоящей. На нее приходится до 70 % от общего времени обработки зубчатого колеса. Зубообрабатывающие станки и инструменты составляют 7...10 % парка станков и используемых инструментов в индустриально развитых странах. Постоянный рост промышленного производства в Беларуси и за рубежом влечет за собой постоянное увеличение объема и номенклатуры производимых зубчатых колес.

Как показывает литературный [1 – 4 и др.] и патентный анализ, в настоящее время в машиностроении нашли применение два основных метода формирования профиля зубьев при нарезании цилиндрических зубчатых колес – метод копирования и метод обката.

Метод копирования характеризуется тем, что профиль зуба полностью определяется формой режущей кромки инструмента. Как правило, формопереносящий образ инструмента при этом соответствует форме впадины зуба нарезаемого колеса. Возможными сочетаниями методов получения производящих линий (образующей и направляющей) в этом случае являются: «копирование + след»; «копирование + касание».

Известными способами зубообработки, реализующими этот метод получения профиля, служат:

- обработка модульными пальцевыми фрезами;
- обработка дисковыми модульными фрезами;
- зубопротягивание;
- обработка зубодолбежными головками для одновременного нарезания всех зубьев.

В методе обката (обкатывания) полоиды инструмента и обрабатываемого колеса обкатываются друг относительно друга без скольжения. Профиль нарезаемых зубьев получается как огибающая последовательных положений режущих кромок инструмента. Для этого случая возможными методами образования поверхности зуба являются: «обкат + след»; «обкат + касание». Названный метод получения профиля реализован в таких известных способах зубообработки, как зубофрезерование червячными фрезами; зубодолбление долбяками; долбление зуборезными гребенками; обкатное зубопротягивание.

Преимущества и недостатки указанных выше методов получения профилей зуба известны и нашли отражение в технической литературе.

Обработка инструментами, работающими по методу копирования, такими как дисковые и пальцевые модульные фрезы, как правило, обладает низкой производительностью и не всегда обеспечивает необходимую точность. Поэтому такую обработку применяют в основном в единичном и ремонтном производстве. Работающие по методу копирования протяжки зубодолбежные головки обеспечивают и высокую производительность (особенно головки), и высокую точность. Их используют чаще всего в крупносерийном и массовом производстве, поскольку подобный инструмент сложен в изготовлении. Кроме то-

го, инструмент не обладает универсальностью, так как позволяет обрабатывать колеса со строго определенным количеством зубьев и постоянным модулем нарезаемого зуба.

Способы нарезания зубчатых колес, реализующих метод обката при получении профиля зуба, обладают универсальностью, так как одним инструментом определенного модуля можно нарезать колеса с различным числом зубьев. Самыми производительными из широко распространенных в промышленности зубообрабатывающих станков являются зубофрезерные, работающие червячной фрезой. Однако они не всегда способны обеспечить необходимую точность обработки. Более высокую точность могут обеспечить зубодолбежные станки, но они чаще всего уступают зубофрезерным в производительности.

Проведенный анализ тенденций развития зубонарезания, результаты которого подробно изложены в [4], позволяет сделать вывод, что указанные известные сегодня способы зубообработки и современное зубообрабатывающее оборудование лишь в относительной мере удовлетворяют запросам промышленности и, по сути, исчерпали свои возможности. С точки зрения использования того или иного технологического метода обработки совершенствование зубонарезания определяется в основном общими тенденциями совершенствования и оптимизации процессов резания. В этом случае могут быть выявлены лишь узко специфические пути совершенствования некоторых процессов зубообработки, дающие достаточно ограниченный эффект.

Рост производства зубчатых колес, таким образом, требует, наряду с совершенствованием известных технологий, поиска, разработки и внедрения новых, более производительных и высокоточных способов зубообработки.

Постановка задачи

Наиболее действенным для совершенствования процессов обработки зубчатых колес нам представляется применение *комплексного метода исследования и проектирования*, составными частями которого являются перечисленные ниже операции:

- 1) представление способа формообразующей обработки зубьев в виде системного объекта. Построение системной модели, с максимальной полнотой описывающей способ как системный объект;
- 2) построение модели синтеза способа зубообработки для определения степени влияния на его совершенствование отдельных факторов и времени их появления;
- 3) систематизация методов формирования поверхностей зубьев зубчатых колес;
- 4) систематизация приемов и методов совершенствования способов зубообработки;
- 5) разработка и внедрение новых высокопроизводительных способов и схем зубообработки на основе анализа системной модели синтеза;
- 6) разработка и использование эффективных математических моделей, имитирующих процессы обработки зубьев для упрощения синтеза и реализации новых способов зубообработки и для исключения грубых концептуальных ошибок. Реализация разработанных моделей на ЭВМ.

Системная модель синтеза способа обработки зубьев зубчатых колес

Способ обработки зубьев (СОЗ) зубчатых колес, как и любой способ формообразующей обработки резанием (СФОР), является системным объектом. Структурно он состоит из некоторого множества компонентов (подсистем), имеющих реальные связи друг с другом. Схема представления системного объекта как структуры подсистем может являться как средством исследования самой системы, так и исследуемым объектом. Выявление эффективности функционирования системного объекта в значительной мере предопределяется эффективностью схемы представления этого объекта. Следовательно, можно говорить об эффективности системной модели как средства исследования и синтеза системного объекта.

Представляется целесообразным положить в основу разработки системной модели СОЗ принципы построения модели СФОР* [5, 6, 8], отвечающей следующим требованиям:

- модель оптимально описывает структуру способа;
- отражает иерархию процесса проектирования системы;
- обладает достаточной гибкостью, структурно развиваема, имеет возможность включения новых компонентов;
- позволяет выявлять эффективность принятых проектных решений.

В указанной модели любой СФОР на начальном этапе синтеза представляется в виде технологической системы неизвестной структуры, на вход которой поступают материал, информация и энергия, а на

* Интенсификация процессов механической обработки прерывистых и профильных поверхностей деталей машин на основе синтеза рациональных схем формообразования и прогрессивных кинематических и компоновочных структур металлорежущих станков: Заключит. отчет; / УО «ПГУ»; Рук. В.А. Данилов; Отв. исп. В.А. Терентьев. – ГБ 1499. – Новополюцк: ПГУ, 1999. – 86 с.

выходе получается результат – готовая деталь. Как системный объект способ обработки должен обеспечить посредством своей реализующей подсистемы выполнение ряда функций для получения этого результата. Эти функции определяются необходимостью реализации потоков материала, информации и энергии. Для каждого из указанных потоков характерны две основные функции: функция переноса (распределения) и функция преобразования.

Материал в форме заготовки зубчатого колеса является объектом воздействия. Преобразование материала здесь осуществляется путем срезания припуска. Функция переноса материала определяется относительным перемещением инструмента и заготовки в процессе резания и перемещениями исполнительных органов реализующей подсистемы.

Энергия в процессе обработки служит средством воздействия на материал заготовки. Преобразование и перенос энергии обеспечивают выполнение всех подфункций способа через функционирование реализующей системы.

Формообразование в зубообработке рассматривается как процесс переноса некоторой полностью заранее определенной, априорной информации с чертежа на заготовку, в результате которого получается зубчатое колесо заданной формы и размеров. Передача заданной информации на объект воздействия (материал) является сутью воздействия. На материал переносится только преобразованная информация, т.е. представленная в форме режущих кромок инструмента и траектории их движений относительно заготовки. Процесс преобразования информации во времени либо предшествует процессу обработки, либо проводится параллельно.

Дифференциация СОЗ проводится на основе последовательного деления основной функции на подфункции. Каждой подфункции однозначно соответствует реализующая ее подсистема. Степень деления (дробность) системного объекта определяется конечностью реализации основной функции через подфункции, т.е. функция делится до тех пор, пока дальнейшее деление станет невозможным. Полнота описания СОЗ при таком методе дифференциации во многом определяется степенью выявления подфункций. Выявленная таким образом структура СОЗ может быть представлена в виде древовидной схемы.

Процесс проектирования (синтеза) СОЗ как системного объекта можно разделить на пять иерархических уровней или этапов:

- концептуальный U_1 ;
- системно-структурный U_2 ;
- схемно-технический U_3 ;
- композиционный U_4 ;
- конструкционный U_5 .

Такое деление позволяет формализовать процесс проектирования, т.е. представить его в виде последовательности проектных логических процедур со строго определенным алгоритмом, что является необходимым условием автоматизации проектирования.

Для построения системной модели синтеза СОЗ древовидная схема дифференциации системного объекта ставится в соответствие с иерархией процесса проектирования, когда выявление каждой из подфункций связывается с определенным и постоянным этапом. Построенная по такой методике модель обладает рядом перечисленных ниже свойств, обеспечивающих удобство и эффективность ее использования:

- 1) модель может быть легко поставлена в соответствие с любой известной и логически верной моделью;
- 2) модель может служить как инструментом синтеза, так и инструментом анализа СОЗ;
- 3) модель наглядна, что облегчает разработку способа обработки;
- 4) модель позволяет выявлять пути совершенствования и оптимизации СОЗ, поскольку легко прослеживаются пути выявления подфункций;
- 5) обеспечивается возможность расширения системной модели путем выявления и включения в ее состав новых функций и компонентов.

На рисунке 1 представлена разработанная на указанных выше принципах системная модель синтеза СОЗ. В приведенной модели полное деление основной функции выполнено на концептуальном и системно-структурном уровнях. На схемно-техническом уровне осуществлено деление подфункции F111. Более подробная дифференциация СФОР была приведена в работе*, где детально расписана методика составления системной модели синтеза.

* Исследование путей интенсификации процессов дискретного формообразования профильных и прерывистых поверхностей при синтезе способов их обработки: Заключение. отчет / УО «ПГУ»; Рук. В.А. Данилов; Отв. исп. В.А. Терентьев. – ГБ 2097. – Новополоцк: ПГУ, 1997. – 100 с.

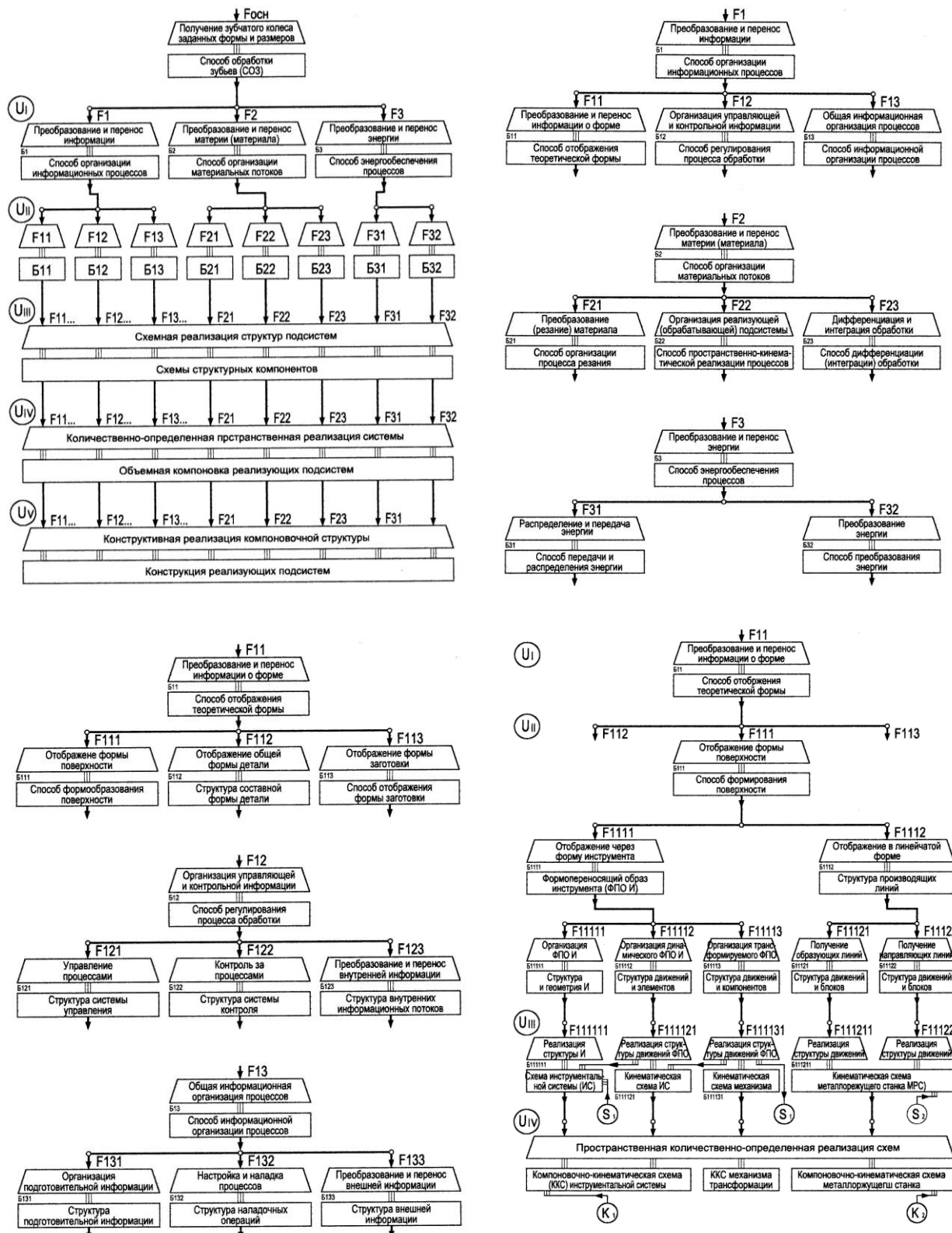


Рис. 1. Системная модель синтеза способа обработки зубьев

Систематизация методов формирования поверхностей зубьев зубчатых колес

Заготовка цилиндрического колеса с внешними зубьями представляет собой цилиндр, диаметр которого равен диаметру окружности вершин колеса. При нарезании зубьев этот диаметр не изменяется, и зубчатый венец образуется только за счет удаления материала заготовки из впадин. Геометрия впадин, и следовательно геометрия зубьев колеса, зависит от способа их нарезания.

Сложность реализации математической зависимости эвольвентного профиля зуба и замкнутый характер впадины накладывают определенные ограничения на методы формообразования зубчатого венца. Как было отмечено, традиционно сложилось так, что в настоящее время в машиностроении используется лишь два основных метода формирования профиля зубьев при нарезании цилиндрических зубчатых колес – метод копирования и метод обката. Соответственно ограничено и общее количество методов образования поверхности зубьев.

Используя известную обобщенную методику классификации методов формообразования [7], можно выявить и систематизировать применяемые методы формирования поверхностей зубьев зубчатых колес. Исследования, результаты которых представлены в [10] и работе*, позволяют дополнить и усовершенствовать классификационную схему методов формообразования зубьев, составленную на основе анализа известных способов зубообработки. Анализ, проведенный на основе разработанной классификационной системы, позволил выявить новые способы зубообработки.

Усовершенствованная классификация [11, 12] представлена на рисунке 2.

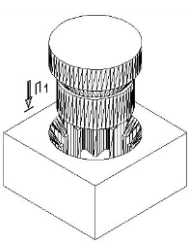
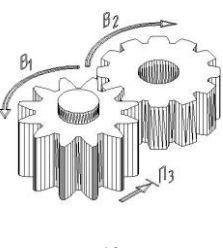
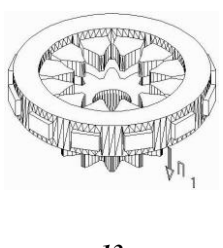
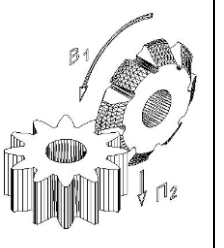
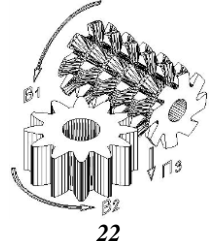
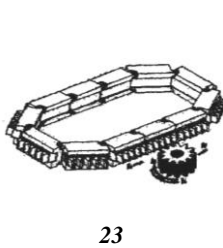
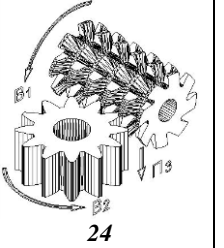
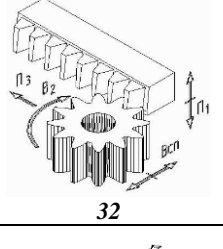
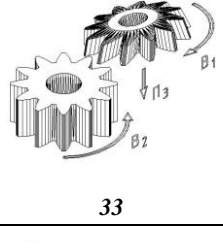
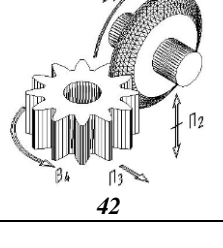
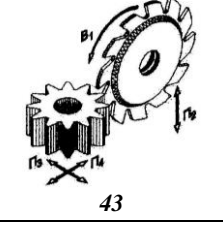
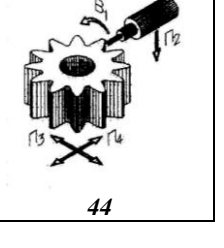
Методы образования образующей геометрической линии	копирование	Методы получения направляющей геометрической линии			
		копирование	обкат	след	касание
		 <i>11</i>	 <i>12</i>	 <i>13</i>	 <i>14</i>
Не осуществимо	 <i>22</i>	 <i>23</i>	 <i>24</i>		
Не осуществимо	 <i>32</i>	 <i>33</i>	Не реализуемо		
Не осуществимо	 <i>42</i>	 <i>43</i>	 <i>44</i>		

Рис. 2. Методы формирования поверхностей зубьев цилиндрических зубчатых колес

* Разработка основ эффективных методов формообразования сложных поверхностей резанием: Заключит. отчет / УО «ПГУ»; Рук. В.А. Данилов; Отв. исп. В.А. Терентьев. – ГБ 4021. Новополоцк: ПГУ, 2005. – 100 с.

В классификационную схему внесены нижеперечисленные изменения.

1) переименованы ячейки для преобразования схемы в двумерный массив (матрицу). Теперь обозначение ячейки состоит из двух цифр: первая цифра обозначает метод получения образующей линии, вторая – метод получения направляющей линии. Цифры соответствуют следующим методам образования производящих линий: 1 – копирование; 2 – след; 3 – обкат; 4 – касание;

2) в незаполненную в известной классификации [7] ячейку 33 внесен разработанный нами способ обработки зубчатых колес резцом, реализующий метод формообразования «след + след»;

3) в пустовавшую ранее ячейку 43 внесен разработанный нами способ обработки зубчатых колес дисковой фрезой, реализующий метод формообразования «касание + след»;

4) в незаполненную ранее ячейку 44 внесен разработанный нами способ обработки зубчатых колес концевой фрезой, реализующий метод формообразования «касание + касание»;

5) в ячейке 23 произведена замена известного способа зуботочения обкаточным резцом разработанным нами способом зуботочения цепным инструментом реечного типа.

Усовершенствованная классификация позволяет систематизировать только методы формообразования зубьев зубчатых колес.

Для систематизации способов обработки зубчатых колес необходима доработка классификационной схемы.

Классификация способов зубообработки должна считаться необходимой задачей. В качестве предпосылок разработки такой классификации можно отметить следующее:

1) классификационная схема должна представлять собой многомерный массив с учетом составляющих общих схем обработки;

2) новая классификационная схема должна учитывать разработанные ранее способы систематизации способов формообразующей обработки, например, такие как [3, 4, 11, 12 и др.];

3) классификационная схема способов должна быть формализована с целью реализации в виде базы данных на ЭВМ.

Разработка новых схем обработки зубьев зубчатых колес

Представленная выше систематизация методов формообразования зубьев, а также использование новых нетрадиционных инструментов, позволяет синтезировать новые общие схемы обработки зубчатых колес.

Известен способ обработки зубчатых колес [13] цепным инструментом, состоящим из шарнирно соединенных и несущих режущие элементы звеньев. В зоне резания звенья образуют поступательно перемещающийся реечный контур. Заготовка колеса в способе имеет возможность перемещения как вдоль контура, так и вдоль оси нарезаемого зуба. На основании этого способа нами разработаны высокопроизводительные зубообрабатывающие станки роторного типа [14, 15].

Анализ отмеченного способа, а также анализ возможностей его реализации, позволил нам выявить как минимум две, существенно отличающиеся друг от друга, общие схемы обработки зубчатых колес подобным инструментом.

Зуботочение цепным инструментом реечного типа. На рисунке 3 представлена схема обработки зубчатого колеса способом зуботочения. В классификационной таблице (см. рис. 2) ему соответствует ячейка 23.

Зубопротягивание цепным инструментом реечного типа. На рисунке 4 представлена схема обработки зубчатого колеса способом зубопротягивания. В классификационной таблице (см. рис. 2) ему также соответствует ячейка 23.

В качестве инструмента в способе используется цепной инструмент I реечного типа. Инструмент состоит из шарнирно соединенных звеньев, несущих режущие элементы, – многовенцовые прямозубые рейки. Каждый вышерасположенный венец имеет вылет больше нижерасположенного, т.е. зубья венцов, расположенных на разных уровнях образуют реечную протяжку.

В способе реализуется метод формообразования зуба «обкат + след».

Для осуществления процесса нарезания зубьев в этом способе осуществляются следующие движения.

1) сложное обкатное движение $\Phi_v(P_1B_2)$ для получения эвольвенты;

2) простое движение $\Phi_s(P_3)$ для получения формы зуба по длине. Данное движение осуществляется осевым перемещением заготовки 2 в плоскости, параллельной плоскости режущего контура.

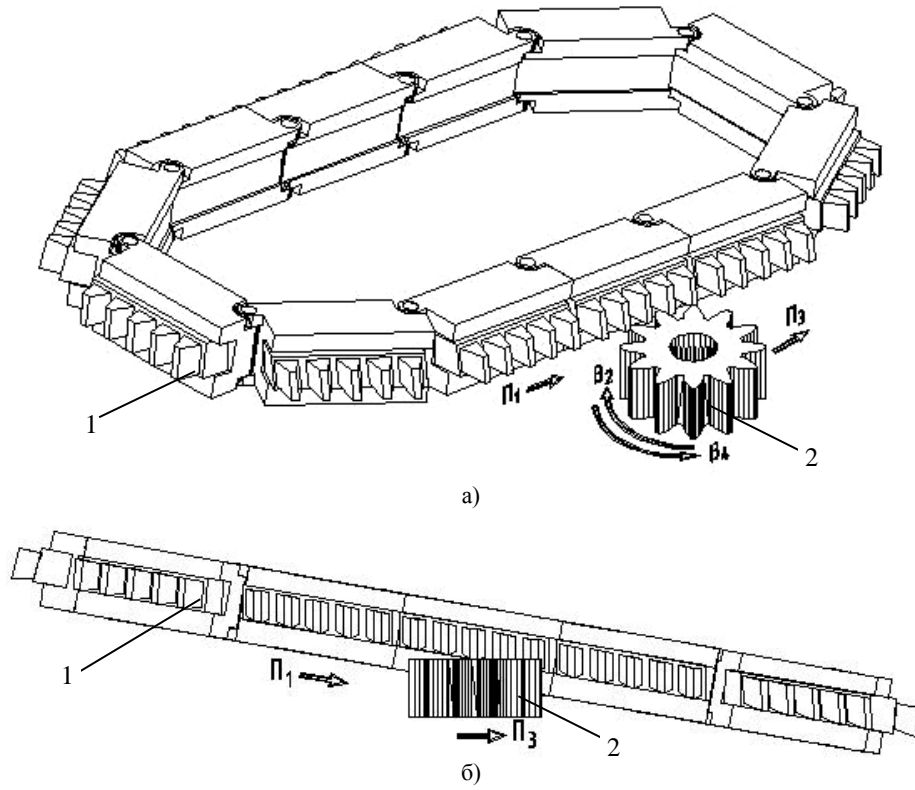


Рис. 3. Схема зуботочения цепным инструментом реечного типа при тангенциальной подаче заготовки

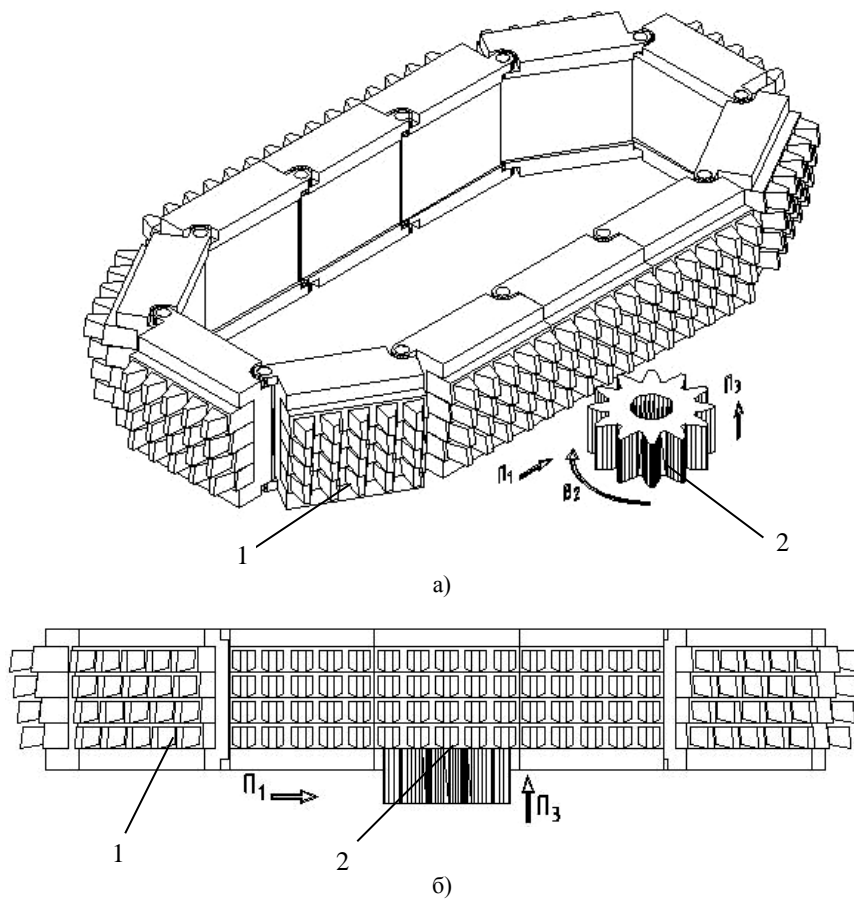


Рис. 4. Схема зубопротягивания цепным инструментом реечного типа при осевой подаче заготовки

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: Учеб. пособие / В.Е. Антонюк, М.М. Кане, В.Е. Старжинский и др. – Мн.: Технопринт, 2003. – 766 с.
2. Производство зубчатых колес: Справочник / С.Н. Калашников, А.С. Калашников, Г.И. Коган и др.: Под общ. ред. Б.А. Тайца. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
3. Голембиевский А.И. Основы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении. – Мн.: Наука и техника, 1986. – 186 с.
4. Харлампиев И.С. Обкатывающее протягивание зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1981. – 211 с.
5. Терентьев В.А. Системная модель способа формообразующей обработки резанием // Современные направления развития производственных технологий и роботехника: Материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: ММИ, 1999. – С. 153.
6. Данилов В.А., Терентьев В.А. Системная модель способа зубообработки как средство его интенсификации на этапе синтеза // Машиностроение: Сб. науч. тр. / Под ред. И.П. Филонова. – Мн.: Технопринт, 2000. – Вып. 16. – С. 115 – 120.
7. Федотенок А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
8. Данилов В.А., Терентьев В.А. Системный подход к проектированию способов формообразующей обработки // Современные методы проектирования машин. – 2004. – Вып. 2, Т. 5. – С. 84 – 89.
9. Данилов В.А., Терентьев В.А. Анализ и классификация методов формообразования зубьев цилиндрических зубчатых колес // Машиностроение: Республ. межведомств. сб. науч. тр.: В 2-х т. Т. 1 / Под ред. И.П. Филонова. – Мн.: Технопринт, 2005. – Вып. 21. – С.
10. Попок Н.Н., Терентьев В.А. Новые способы обработки зубчатых колес и их реализация через блочно-модульную инструментальную систему // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. – Мн.: Технопринт, Новополоцк: ПГУ, 2005.
11. Данилов В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием. – Мн.: Наука и техника, 1995. – 264 с.
12. Попок Н.Н. Мобильная реорганизация машиностроительного производства. – Мн.: Технопринт, 2001. – 396 с.
13. А.с. 1653917 СССР, МКИ В23F 5/28. Способ нарезания цилиндрических зубчатых колес / В.А. Терентьев, А.И. Трофимов // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 21.
14. А.с. 1504019. Зубообрабатывающий станок роторного типа / В.А. Терентьев, И.В. Терентьева, А.И. Трофимов // Открытия. Изобретения. – 1989. – № 32.
15. А.с. 1590228. Зубообрабатывающий станок роторного типа / В.А. Терентьев, И.В. Терентьева, А.И. Трофимов // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 33.