

УДК.621.833.2

## Новая технология изготовления ортогональных смешанных конических и гиперболоидных передач

Андрианов П.А.

Описывается новая технология изготовления ортогональных смешанных конических и гиперболоидных передач, ориентированная на единичное и серийное производство. Область ее применения – авиа- и приборостроение, производство спецтехники.

Ключевые слова: ортогональные смешанные конические и гиперболоидные передачи; технология; единичное и серийное производство

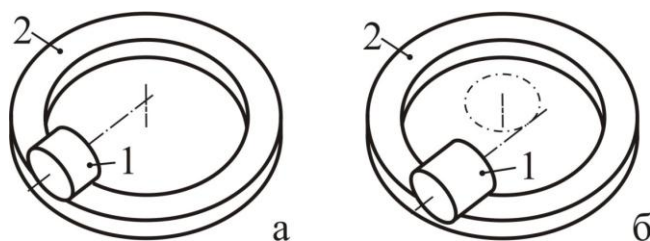


Рисунок 1 – Ортогональные смешанные передачи: а – коническая, б – гиперболоидная

Ортогональные смешанные конические и гиперболоидные передачи (ОСКГП) предназначены для передачи вращения между валами, оси которых пересекаются или скрещиваются под прямым углом. Они состоят из цилиндрической шестерни 1 (рисунок 1) и плоского колеса 2. ОСКГП известны с древнейших

времен. Римляне использовали их в мельницах (рисунок 2а). Позднее они широко применялись в металлообрабатывающих станках (рисунок 2б). По ряду объективных причин, к концу 19 века ОСКГП были вытеснены коническими и гипоидными передачами.

В середине XX века ОСКГП вновь привлекли внимание специалистов. В Советском Союзе и США была исследована геометрия таких передач, однако занять свою нишу они не смогли, поскольку не была решена проблема технологичности плоских колес. Нарезать их можно было стандартным инструментом – долбяком, но для этого требовался станок с взаимно перпендикулярными осями штосселя и шпинделя заготовки (рисунок 3а). Серийный выпуск такого оборудования был нецелесообразен, а создание специальных станков или модернизация серийных могли быть обоснованы только в редких случаях.

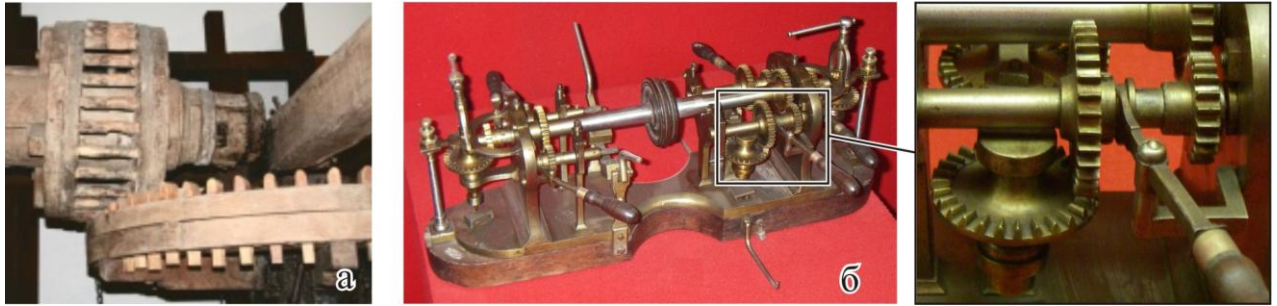


Рисунок 2 – ОСКП в старинной технике: а – деревянная передача мельницы; б – модель станка для обработки деталей ружейных замков, XVIII в.

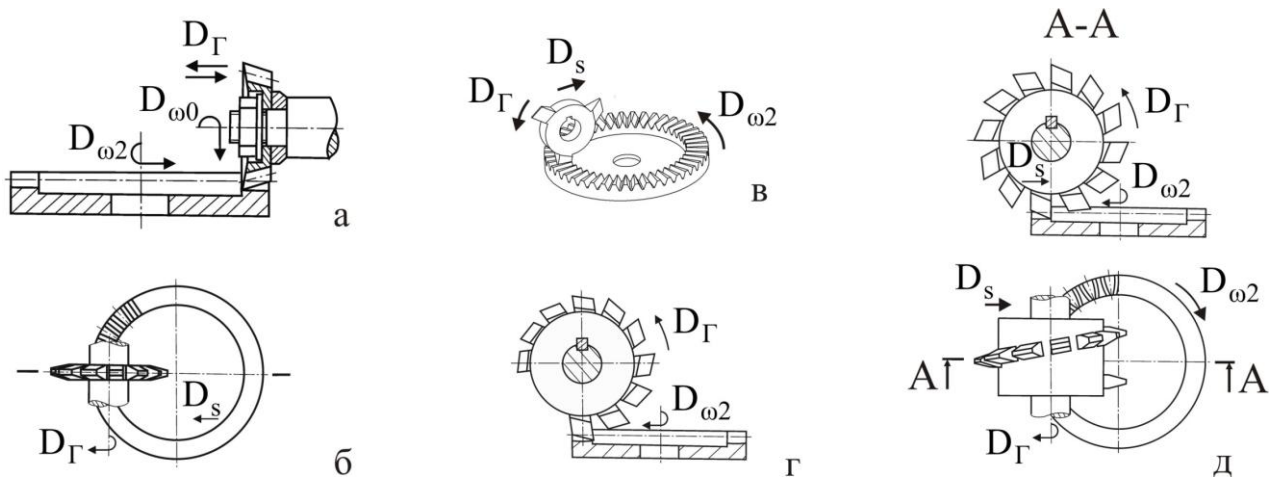


Рисунок 3 – Схемы нарезания зубьев плоских колес

Когда конструктивные особенности механизмов позволяли, применяли «приближенную» технологию нарезания плоских колес дисковой модульной фрезой (рисунок 3б). Такие механизмы (рисунок 4) используются в зенитном комплексе «Каштан» и в автоматических авиационных пушках. Также исследовались «приближенные» технологии нарезания зубьев плоских колес по методу обката: дисковыми фрезами (рисунок 3в), одновитковыми

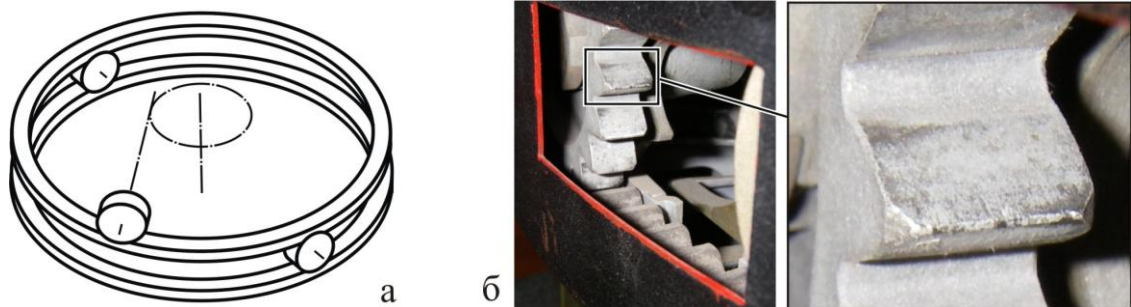


Рисунок 4 – ОСКГП с плоскими колесами, изготовленными «приближенным» методом: а – схема механизма; б – передача со следами кромочного контакта на зубьях шестерни

червячными фрезами (рисунок 3д), одновитковыми червячными фрезами-протяжками (рисунок 3г). Во всех этих случаях затраты на производство снижались, но страдали эксплуатационные характеристики передач.

Условия для эффективного применения смешанных конических и гиперboloидных передач (СКГП) сложились с развитием вычислительной техники и станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Анализ приобретенной за рубежом литературы показал, что там исследования СКГП особенно активно ведутся на протяжении последних 20 лет.

В США с 1990 года выполняются работы, имеющие целью применение СКГП в основных приводах вертолетов и другой авиационно-космической технике [1, 2]. Ведущей исследовательской организацией является Gear Research Center при University of Illinois at Chicago, действующий совместно с NASA Glenn Research Center, NASA Lewis Research Center, U.S. Army Research Laboratory, Boeing Co, McDonnell Douglas Helicopter Co, Lucas Western Inc. В результате был создан основной привод для боевого вертолета AH-64 «Apache». При его разработке изготавливались и испытывались ортогональные смешанные конические передачи (ОСКП), показанные на рисунках 5, 6.

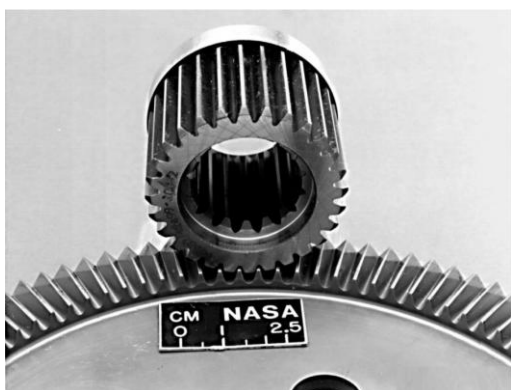


Рисунок 5 – ОСКП до испытаний



Рисунок 6 – Плоское колесо после испытаний

Работы Gear Research Center, выполненные под руководством Ф.Л. Литвина, дали значительный технический и экономический эффект и были высоко оценены специалистами. Реализация принципа разделения момента за счет использования смешанных конических передач в основном приводе вертолета фирмы Lucas Western Inc позволила снизить его массу на 40% и шум на 10 децибел [3]. Руководитель программы по развитию технологии передач смешанного зацепления компании Boeing Robert J. King заявил [4]: «Наиболее важно то, что использование торцовых передач для разделения крутящего момента в приводах вертолетов продемонстрировало потрясающий потенциал для сокращения массы и стоимости.

Мы планируем уменьшение массы на 30 % и уменьшение стоимости на 20 % для привода нового вертолета и изменяем главные передачи для применения этой технологии ... Мы планируем применить технологию при модернизации для армии США вертолетов AH-64 «Apache» в течение следующих нескольких лет. Профессор Литвин сделал огромный вклад в разработку этой очень перспективной технологии».

Помимо описанных выше вертолетных приводов, в Gear Research Center при поддержке NASA разрабатывались другие механизмы, использующие принцип разделения потока мощности (рисунок 7, [5]). Особенностью изображенной на рисунке 7б передачи, помимо компактности, является возможность получения малых передаточных отношений.

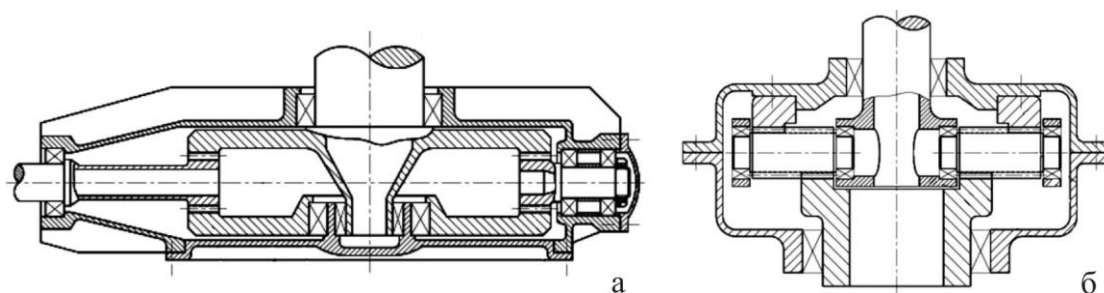


Рисунок 7 – Передачи, использующие принцип разделения потока мощности, с большим (а) и малым (б) передаточным отношением

В Европе ведущей организацией по исследованию и производству СКПП является швейцарская фирма ASS («Antriebstechnik Stefan Schoen»), сотрудничающая с Eidgenössische Technische Hochschule (Zürich) и Fribourger Universität. С 1993 года СКПП (в подавляющем большинстве случаев – ОСКПП) были успешно применены во множестве изделий. В качестве примера можно назвать (рисунок 8): привод крупногабаритной антенны радара, «Вариблок» – гидромеханический вариатор большой мощности, различное технологическое оборудование, автотранспортную технику. Необходимо отметить, что изначально смешанными коническими передачами занималась голландская фирма Crown Gear. В 2003 она была куплена фирмой ASS со всеми патентами, лицензиями и ноу-хау. На тот момент ASS ежегодно использовала в своих изделиях от 10 до 15 тысяч СКПП, изготовленных Crown Gear [6]. По заказу ASS фирмой KISSsoft была выполнена интеграция специализированных программ Crown Gear со своим программным обеспечением. Это позволило программам KISSsoft-Hirware определять геометрию плоских и конических колес, строить трехмерные графические модели, рассчитывать прочность и ресурс. На основе этого программы Crown Gear рассчитывают геометрию инструмента и параметры технологического процесса.

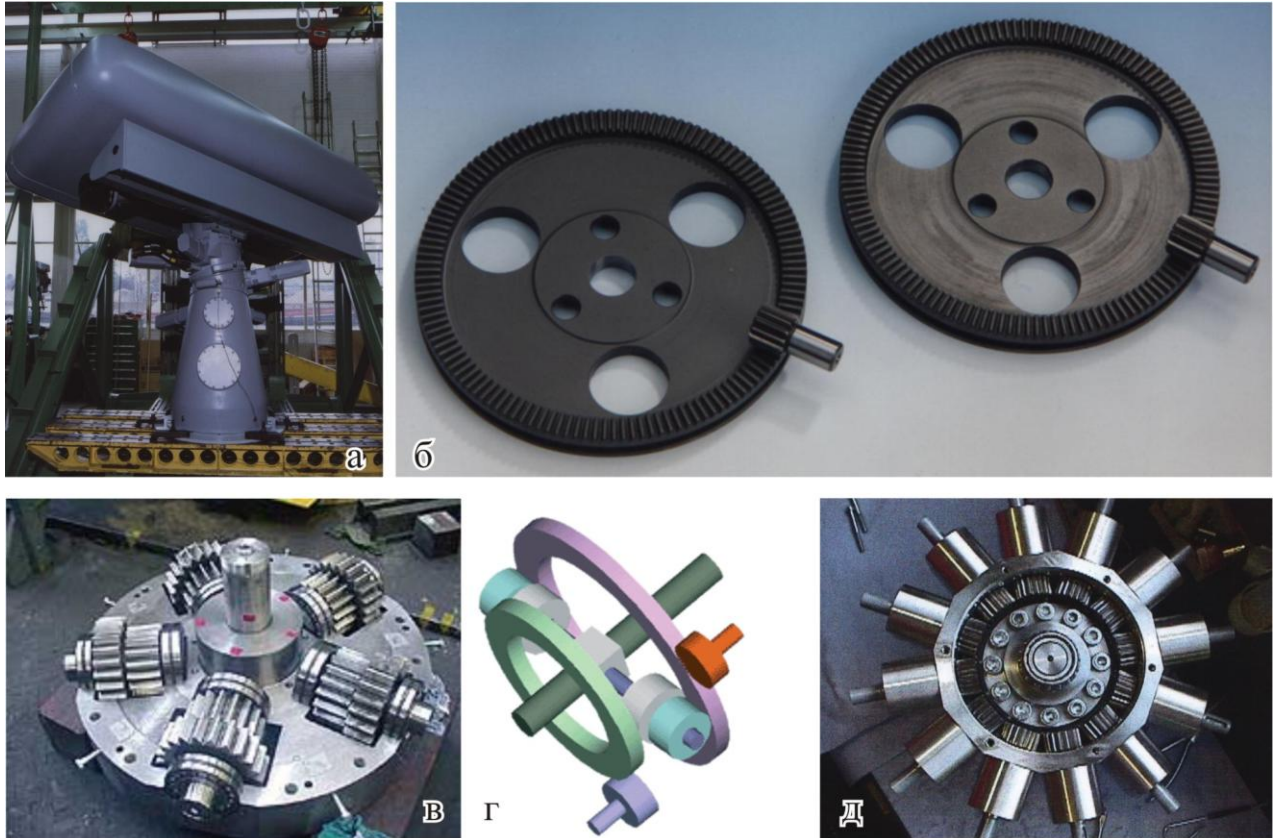


Рисунок 8 – Передачи фирмы ASS в различных изделиях: а, б – радар и передачи его привода; в, г – «Вариблок» и его схема; д – инструментальная головка

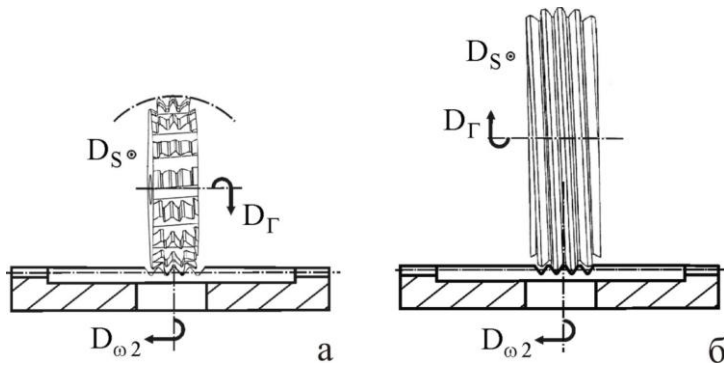


Рисунок 9 – Обработка плоского колеса червячным торообразным инструментом

В результате зарубежных исследований последних лет развита и внедрена предложенная в 1942 г. в США E.W. Miller технология нарезания плоских колес торообразной червячной фрезой (рисунок 9а). Также внедрены: технология шлифования зубьев плоских колес торообразным червячным кругом (рисунок 9б), дисковыми коническими кругами с прямолинейной, эвольвентной, криволинейной неэвольвентной образующими, реализован процесс хонингования. Это позволяет изготавливать ОСКГП с высокими эксплуатационными характеристиками. Однако использование при нарезании зубьев плоского колеса специального инструмента и модернизированного (доработанного) оборудования делают подготовку производства дорогостоящей, что признается даже зарубежными экспертами.

Обобщая отечественный и зарубежный опыт, можно утверждать, что исследования СКГП «последней волны» начались в нашей стране, Европе и США практически одновременно – в 90-х годах прошлого века. Их основной целью было создание обобщенной геометрической теории СКГП на основе эвольвентных шестерен для всех сочетаний межосевых углов и расстояний, разработка и внедрение эффективных технологий зубообработки плоских колес. К настоящему времени результаты зарубежных исследований внедрены в производство, СКГП (в большинстве случаев ортогональные) применены в перспективных образцах техники со значимым эффектом. Отечественные исследования были прекращены до изготовления опытных образцов передач из-за отсутствия финансирования и неостребованности промышленностью.

Зарубежные работы в области СКГП характеризуется двумя общими чертами – стремлением к достижению максимального технического эффекта при использовании СКГП и значительными затратами на исследования и технологическую подготовку производства серийных изделий. Учитывая современные особенности развития экономики нашей страны, можно утверждать, что в условиях отечественной промышленности наибольшие перспективы будет иметь технология, требующая минимальных затрат на подготовку производства, что можно обеспечить за счет использования стандартного инструмента и серийного оборудования.

Для рационального решения проблемы изготовления ОСКГП в условиях единичного и серийного производств предлагается технология их нарезания торцовыми зуборезными головками на фрезерных станках с ЧПУ общего назначения. Схемы обработки были предложены к.т.н. Шейниным Г.М. и д.т.н. Бобковым М.Н. Автором при выполнении настоящей работы исследовано рабочее зацепление, станочные зацепления для плоского колеса и шестерни, разработаны соответствующие расчетные методики, программное обеспечение, выполнено моделирование передач.

Формообразование зубьев плоского колеса осуществляется по методу копирования на станке типа обрабатывающий центр. Сущность метода состоит в следующем. Заготовку 1 колеса (рисунок 10а) обрабатывают торцовой зуборезной головкой 2. При нарезании прямых зубьев ось инструмента  $O_0$  можно расположить параллельно оси  $O_2$  заготовки. В процессе обработки инструменту сообщают главное движение резания  $D_T$  и движение подачи  $D_S$  вдоль его оси. За один цикл обрабатывают разноименные (левую и правую) поверхности двух зубьев. Затем инструмент отводят в осевом направлении, осуществляют деление на зуб и цикл обработки повторяют. После  $z_2$  циклов формирование венца заканчивают. При такой обработке боковые поверхности зубьев плоского колеса совпадают с поверхностью

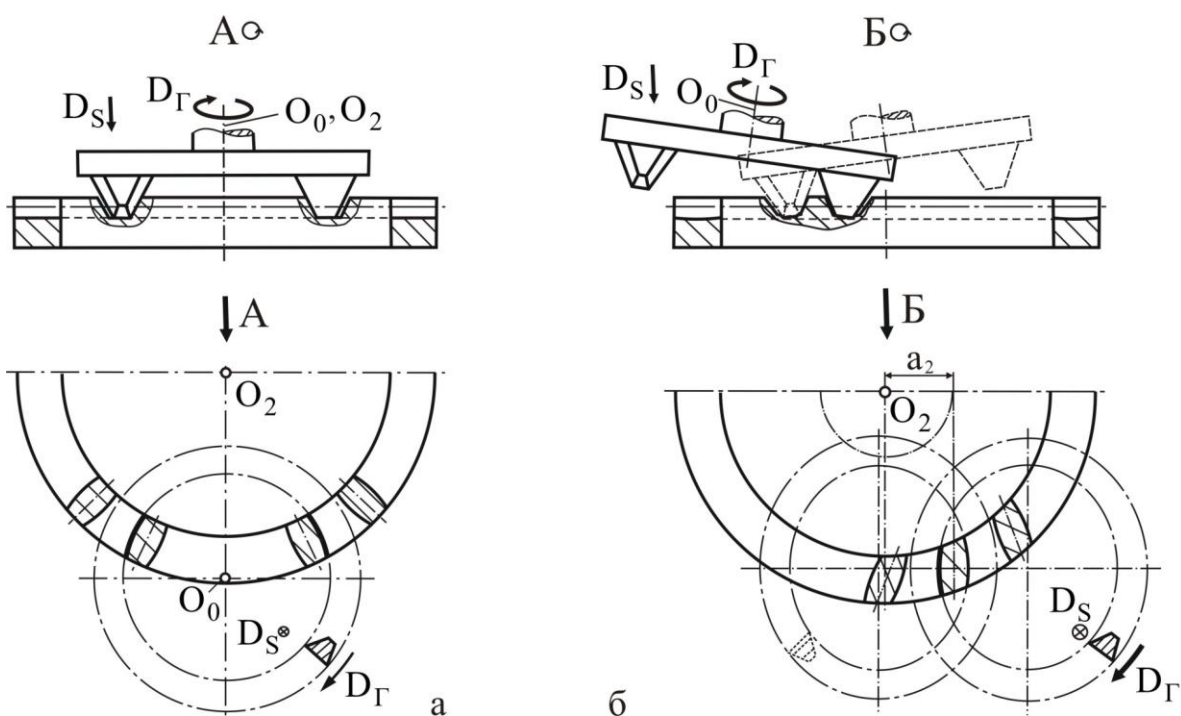


Рисунок 10 – Схемы обработки плоского колеса торцовой зуборезной головкой

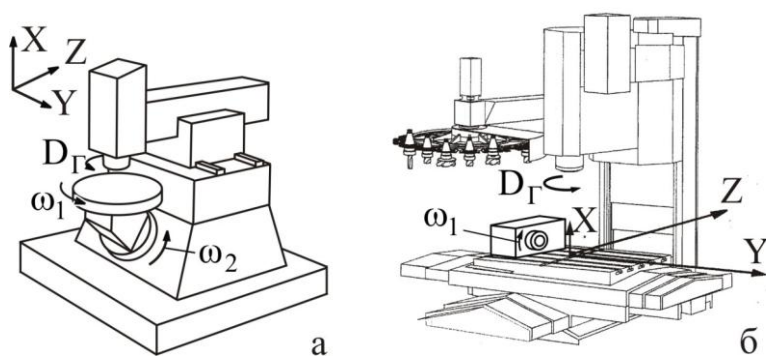


Рисунок 11 – Станки, пригодные для обработки зубчатых колес ОСКГП

главного движения. Зубья могут иметь бочкообразную или корсетную форму в продольном направлении. При изготовлении колеса с тангенциальными зубьями для устранения вторичного резания инструмент необходимо наклонять (рисунок 10б). В качестве примера на

рисунке 11 изображены станки, пригодные для нарезания плоских колес (делительная головка на рисунке 11б не требуется).

Шестерня обрабатывается по методу обката с единичным делением. Поэтому заготовка в станочном зацеплении должна «перекатываться» по воображаемому производящему колесу, имитирующему реальное плоское колесо. В зависимости от конструкции станка возможны различные варианты схем обработки. Рассмотрим изготовление шестерни инструментом, установленным без наклона. Требуемый результат можно получить, если заготовке 1 (рисунок 12а) сообщить круговую подачу  $D_{\omega_1}$  относительно неподвижной оси  $O_1$ , а инструмент 3 перемещать из положения I в положение II, сообщая ему две линейных пода-

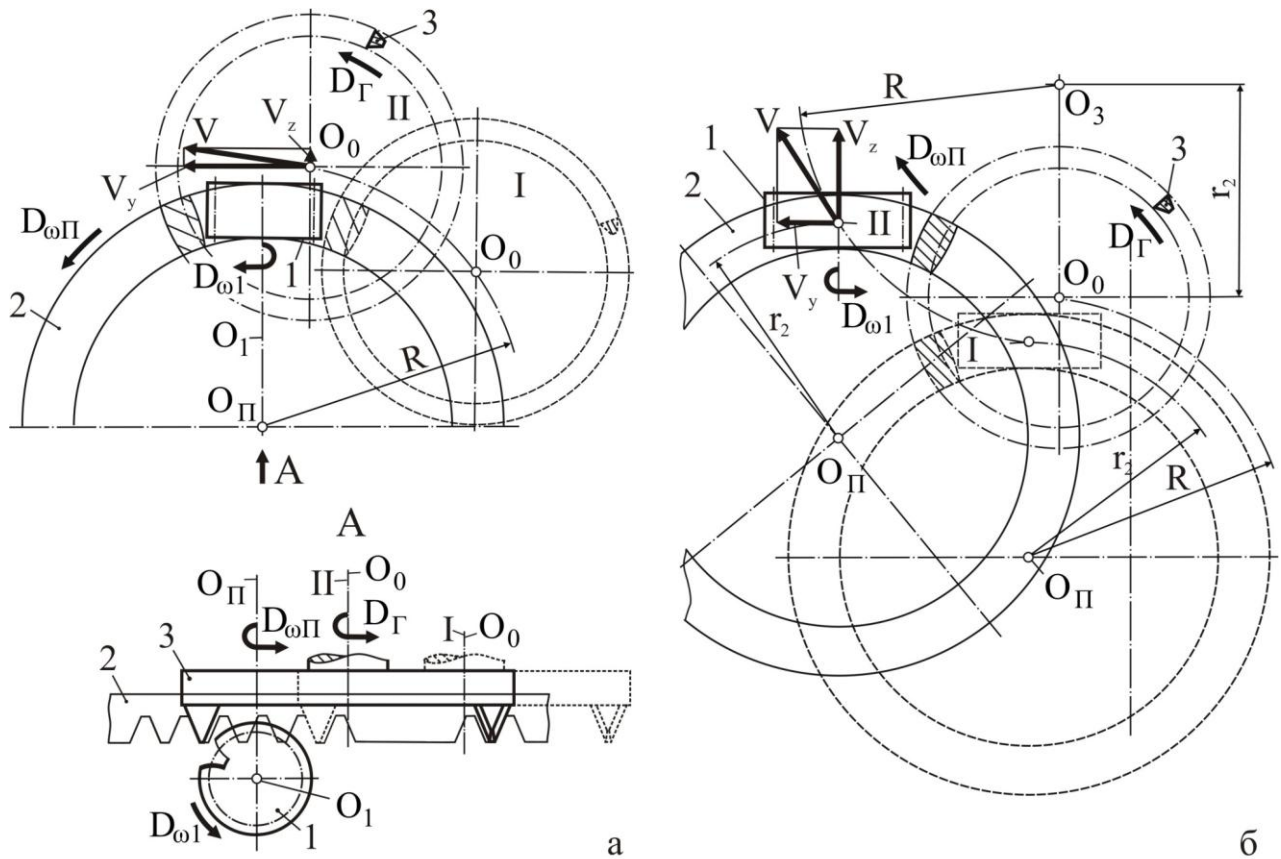


Рисунок 12 – Схемы обработки шестерни

чи со скоростями  $V_y$ ,  $V_z$ . Такое движение инструмента соответствует вращению  $D_{\omega\Pi}$  производящего плоского колеса. Реализовать эту схему обработки можно, например, на станке, изображенном на рисунке 11а. Однако такое оборудование имеет достаточно высокую стоимость.

При обработке можно не менять положение оси инструмента  $O_0$  (рисунок 12б), а заготовке шестерни помимо круговой подачи  $D_{\omega 1}$  сообщить два линейных перемещения со скоростями  $V_y$ ,  $V_z$  так, чтобы центр заготовки двигался по дуге окружности радиуса  $R$  относительно точки  $O_3$ . В этом случае заготовка и производящее колесо переместятся из положения I в положение II, причем производящее колесо будет скользить боковой поверхностью своего зуба по производящей поверхности. Для реализации этой схемы обработки достаточно станка, имеющего три управляемых координаты, одна из которых, круговая, может обеспечиваться накладным ЧПУ-столом (см. рисунок 11б). Такое оборудование в силу меньшей стоимости имеется на большинстве машиностроительных предприятий.



Для изготовления шестерен с применением наклоненного инструмента необходим станок с пятью управляемыми координатами, две из которых круговые, например, изображенный на рисунке 11а.

Определение геометрических параметров зубчатых колес, рабочего и станочных зацеплений включает следующие этапы:

1 По заданным конструктивным параметрам, таким как модуль, число зубьев и т.д., определяются параметры зуборезного инструмента и его установки для обработки плоского колеса.

2 Анализируется приемлемость варианта плоского колеса с конструктивной и технологической точек зрения. В частности, проводится проверка зубьев на срезание, устанавливается возможность обеспечения минимально необходимого припуска на обработку боковой поверхности соседнего с формируемым зуба и полного прорезания впадины, при обработке зубьев с наклоном инструмента вычисляется значение погрешности формы дна впадины плоского колеса.

3 С учетом обеспечения бокового зазора и продольной локализации пятна контакта зубьев рассчитываются параметры инструмента и его установки при нарезании зубьев шестерни.

4 Определяются геометрические параметры шестерни и устанавливается их приемлемость с конструктивной и технологической точек зрения. При этом проводится проверка зубьев на срезание и подрезание, анализируется возможность обеспечения припуска на боковой поверхности соседнего с формируемым зуба и полного прорезания впадины. При нарезании зубьев с наклоном инструмента рассчитывается значение погрешности формы дна впадины.

Исследование станочного и рабочего зацеплений основывается на рассмотрении производящей поверхности относительно элементов этих зацеплений – инструмента, плоского колеса, шестерни, с каждым из которых связывается собственная система координат. Производящая поверхность задается в системе координат инструмента. Зависимости, описывающие ее положения относительно других элементов зацепления, определяются посредством матричных преобразований координат.

Производящей поверхностью, в зависимости от того, нарезаются корсетные или бочкообразные зубья, будет одна из конических поверхностей главного движения  $S_i$  или  $S_e$  (рисунок 13).

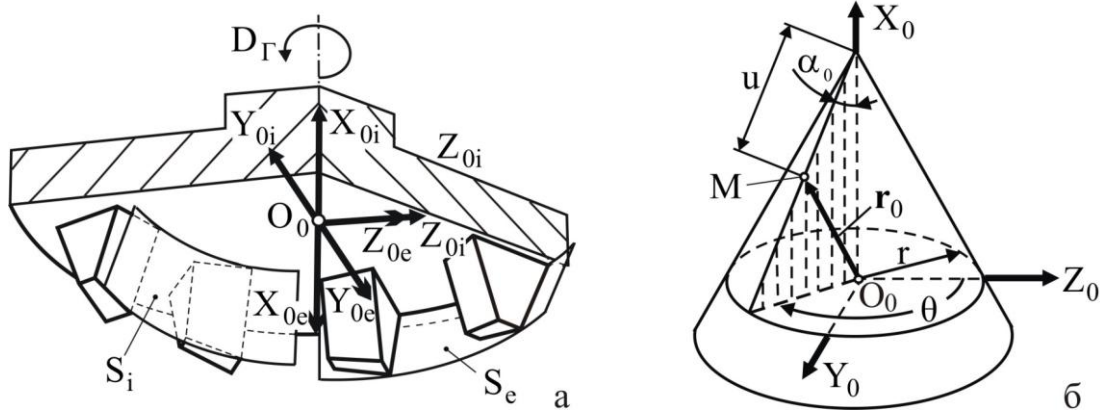


Рисунок 13 – Инструмент и производящая поверхность

В собственной системе координат  $X_0Y_0Z_0$  (индексы  $i, e$  опущены), производящую поверхность можно описать вектор-функцией

$$\mathbf{r}_0 = \begin{bmatrix} r \operatorname{ctg} \alpha_0 - u \cos \alpha_0 \\ u \sin \alpha_0 \sin \theta \\ u \sin \alpha_0 \cos \theta \end{bmatrix},$$

где  $r$  – радиус основания конуса;

$u$  – расстояние от вершины конуса до текущей точки  $M$ ;

$\theta$  – угол между плоскостью  $X_0O_0Z_0$  и текущим осевым сечением;

$\alpha_0$  – половина угла при вершине конуса.

Производящая поверхность в системе координат  $X_2Y_2Z_2$  (рисунок 14) описывается вектор-функцией

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{M}_{20} \mathbf{r}_0 = \begin{bmatrix} \operatorname{ctg} \alpha_0 \cos \gamma_0 r - \cos \gamma_0 \cos \alpha_0 u + \sin \alpha_0 \sin \gamma_0 u \sin \theta + x_{200} \\ -\operatorname{ctg} \alpha_0 \sin \gamma_0 r + \sin \gamma_0 \cos \alpha_0 u + \cos \gamma_0 u \sin \alpha_0 \sin \theta + y_{200} \\ u \sin \alpha_0 \cos \theta + z_{200} \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{M}_{20}$  – матрица перехода к системе координат плоского колеса  $X_2Y_2Z_2$  (рисунок 8) от системы координат  $X_0Y_0Z_0$ ;

$x_{200}, y_{200}, z_{200}$  – координаты точки  $O_0$  в системе  $X_2Y_2Z_2$ ;

$\gamma_0$  – угол наклона оси производящей поверхности.

При исследовании геометрии плоского колеса, нарезаемого без наклона инструмента, расчеты можно упростить, представив производящую поверхность в виде набора параллельных плоскости  $Y_2O_2Z_2$  плоских сечений – окружностей.

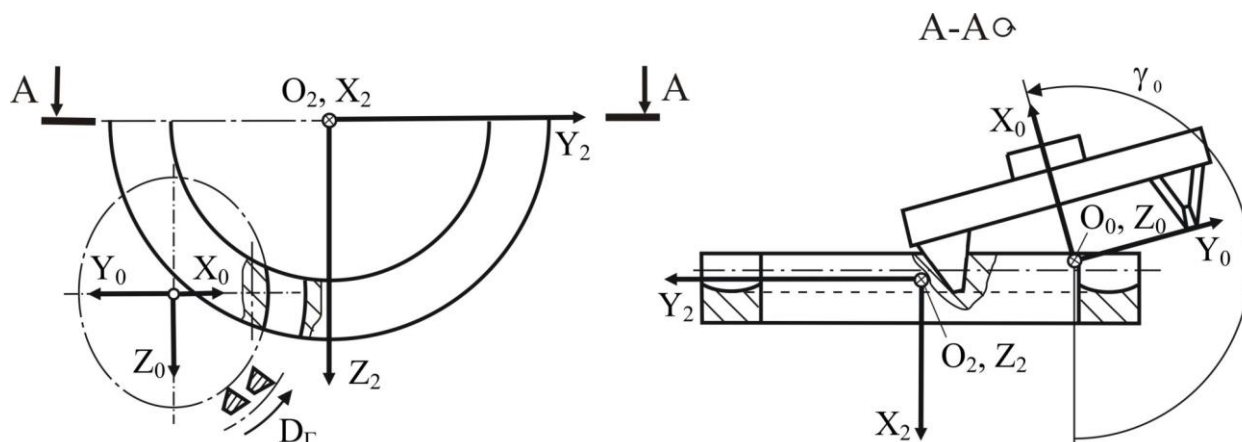


Рисунок 14 – Системы координат плоского колеса и инструмента

Расчет геометрических параметров плоского колеса, инструмента и наладки станка при формообразовании зубьев без наклона оси зуборезной головки осуществляется в несколько этапов.

1 Исходя из требуемой продольной кривизны зубьев, принимаются значения радиуса инструмента и числа зубьев  $z_g$ , охватываемых инструментом при обработке (рисунок 15).

2 Определяется радиус делительной окружности колеса

$$r_2 = \frac{m_t z_2}{2},$$

где  $m_t$  – окружной модуль;

$z_2$  – число зубьев колеса.

3 Рассчитывается угол охвата зубьев колеса инструментом

$$\zeta = \tau_2 z_g \pm 2\eta_{\tau_2},$$

где  $2\eta_{\tau_2} = k_{\eta_{\tau_2}} \tau_2$  – угловая ширина впадины по делительной окружности;

$k_{\eta_{\tau_2}}$  – коэффициент угловой ширины впадины;

$\tau_2$  – угловой шаг зубьев плоского колеса.

Знак «+» в формуле соответствует корсетным зубьям, а «-» – бочкообразным.

4 Вычисляется расстояние между осями инструмента и заготовки

$$a_0 = r_2 \cos \frac{\zeta}{2} + \sqrt{r_{d0}^2 - \left( r_2 \sin \frac{\zeta}{2} \right)^2},$$

где  $r_{d0}$  – радиус конической формообразующей поверхности главного движения в делительной плоскости.

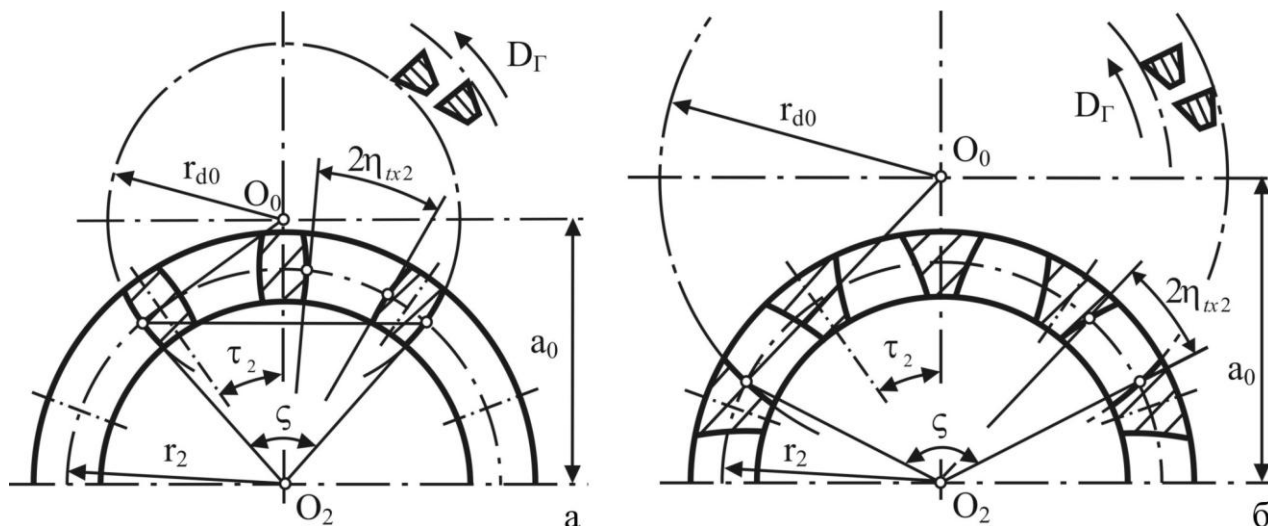


Рисунок 15 – Схемы к определению расстояния между осями инструмента и заготовки

5 Определяется приемлемость параметров плоского колеса, инструмента и наладки станка по ряду конструктивных и технологических критериев.

5.1 Выполняется проверка зубьев на срезание, определяется толщина вершины зуба.

5.2 Устанавливается приемлемость принятого значения радиуса неформообразующей стороны инструмента из условия обеспечения припуска на боковые поверхности зубьев (рисунок 16).

5.3 Устанавливается приемлемость принятого значения радиуса неформообразующей стороны инструмента из условия полноты прорезания впадины (рисунок 17).

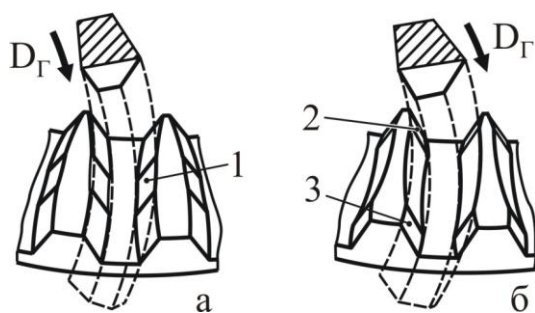


Рисунок 16 – Срезание боковых поверхностей зубьев неформообразующей режущей кромкой: 1, 2, 3 – участки срезания зуба

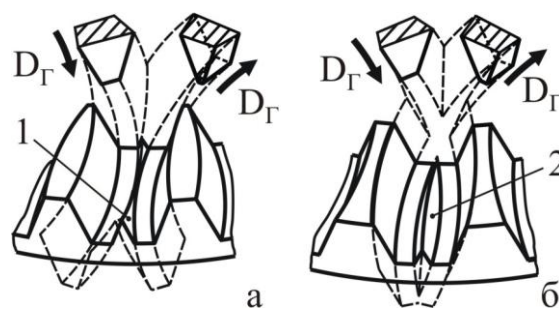


Рисунок 17 – Неполное прорезание впадины: 1, 2 – гребни неудаленного материала

Схема обработки зубьев с наклоном оси инструмента позволяет формировать как прямые, так и тангенциальные зубья. В расчетной схеме, как общий случай, рассматривается формирование тангенциальных зубьев (рисунок 18).

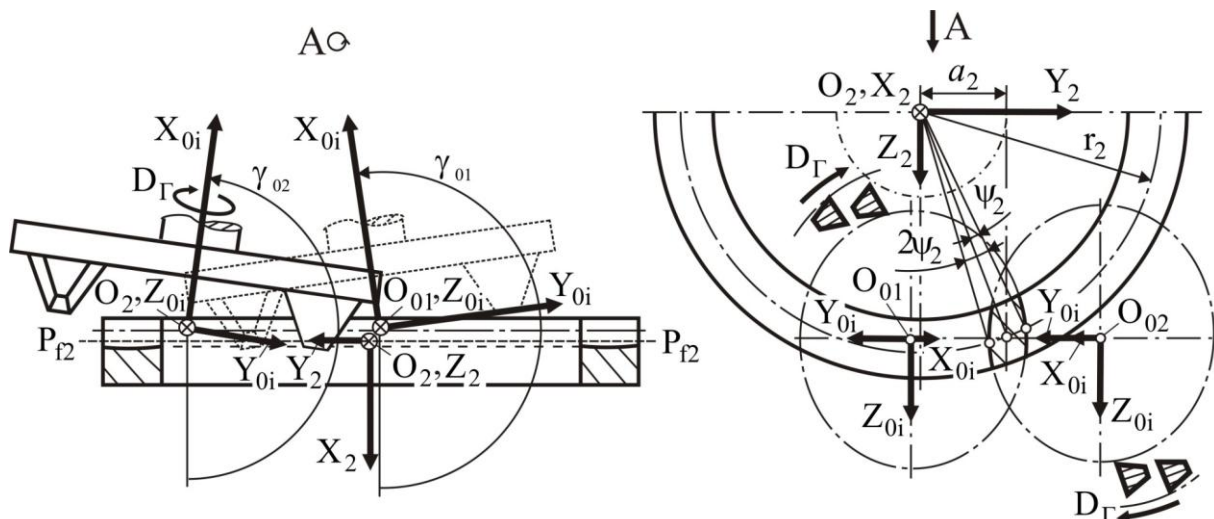


Рисунок 18 – Схема формирования тангенциального бочкообразного зуба плоского колеса

При этом предлагается следующий порядок расчета:

1 Исходя из требуемой кривизны линий зуба и его торцевой разнотолщинности, принимаются значения радиусов инструмента и координата  $z_{002}$  центра инструмента.

2 Рассматриваются два положения инструмента, соответствующие формированию разноименных сторон одного зуба. Исходя из величины смещения зуба  $a_2$ , угловой ширины впадины  $2\psi_2$ , положения номинальной плоскости дна впадины  $P_{f2}$ – $P_{f2}$ , для этих положений вычисляются координаты  $x_0$ ,  $y_0$  центра инструмента (точки  $O_{01}$ ,  $O_{02}$ ) и значения углов наклона  $\gamma_{01}$ ,  $\gamma_{02}$  оси инструмента, обеспечивающие формирование зуба требуемой геометрии без вторичного резания заготовки.

3 Анализируется приемлемость конструкции плоского колеса и наладки для нарезания зубьев по ряду конструктивных и технологических критериев.

3.1 Выполняется проверка зубьев на срезание, определяются минимальная и торцовые толщины вершины зуба.

3.2 Устанавливается приемлемость радиуса неформообразующей стороны инструмента из условий обеспечения припуска на боковых поверхностях зубьев и полноты прорезания впадины.

3.3 Вычисляется значение погрешности формы дна впадины плоского колеса, обусловленной наклоном оси инструмента.

Для определения геометрических параметров шестерни необходимо иметь зависимость, описывающую боковые поверхности ее зубьев. Для ее определения был использован известный кинематический метод теории зубчатых зацеплений, основанный на том, что в точке контакта боковых поверхностей зубьев вектор скорости относительного движения

должен лежать в плоскости, касательной к этим поверхностям. Используя равенство нулю скалярного произведения перпендикулярных векторов, эту теорему записывают как

$$\mathbf{n}\mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

где  $\mathbf{n}$  – нормаль к сопряженным поверхностям в точке контакта;

$\mathbf{v}$  – скорость относительного движения.

При обкате заготовки шестерни по производящему колесу коническая производящая поверхность занимает в системе координат заготовки множество положений, образуя семейство поверхностей, параметр которого – фаза зацепления  $\varphi_2$ . Боковая поверхность зуба шестерни, являющаяся огибающей этого семейства, определяется зависимостями

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{r}_1 &= \mathbf{r}_1(u, \vartheta) \\ u &= u(\vartheta, \varphi_2) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{r}_1$  – вектор-функция производящей поверхности в системе координат шестерни;

$u = u(\vartheta, \varphi_2)$  – уравнение зацепления.

Для определения вектор-функции  $\mathbf{r}_1$  были введены (рисунок 19) система координат шестерни  $X_1Y_1Z_1$  и вспомогательная система координат  $X_aY_aZ_a$ . Первая жестко связана с шестерней (заготовкой), относительно второй шестерня имеет одну степень свободы – вращение вокруг оси  $Z_a$ , центры  $O_1, O_a$  этих систем совпадают.

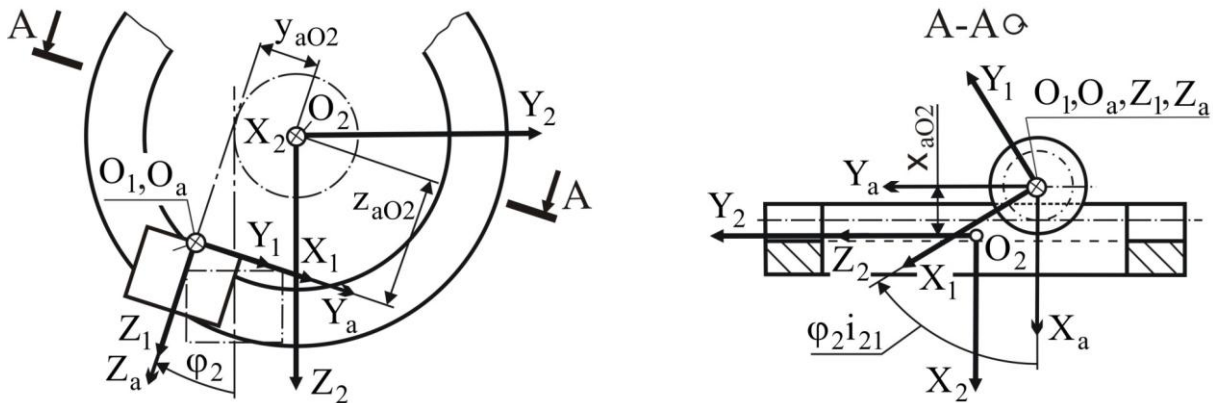


Рисунок 19 – Системы координат плоского колеса и шестерни

Матрица перехода к системе координат шестерни  $X_1Y_1Z_1$  от системы координат производящей поверхности  $X_0Y_0Z_0$

$$\mathbf{M}_{10} = \mathbf{M}_{1a}\mathbf{M}_{a2}\mathbf{M}_{20},$$

где  $\mathbf{M}_{a2}$  – матрица перехода к системе координат  $X_aY_aZ_a$  от системы  $X_2Y_2Z_2$ ;

$\mathbf{M}_{1a}$  – матрица перехода к системе координат  $X_1 Y_1 Z_1$  от системы  $X_a Y_a Z_a$ .

Искомая вектор-функция производящей поверхности в системе координат шестерни

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{M}_{10} \mathbf{r}_0,$$

где  $\mathbf{r}_0$  – вектор-функция производящей поверхности в собственной системе координат.

Второе уравнение системы (2) – уравнение зацепления – можно получить с помощью зависимости (1). В нашем случае вектор нормали к производящей поверхности

$$\mathbf{n} = \frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial \theta} \times \frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial u}. \quad (3)$$

Вектор скорости точки производящей поверхности относительно точки шестерни, записанный в системе координат производящей поверхности

$$\mathbf{v} = \mathbf{M}_{01} \frac{d\mathbf{M}_{10}}{d\varphi_2} \mathbf{r}_0, \quad (4)$$

где  $\mathbf{M}_{01}$  – матрица перехода к системе координат  $X_0 Y_0 Z_0$  от системы координат  $X_1 Y_1 Z_1$ , которую нетрудно получить обращением матрицы  $\mathbf{M}_{10}$ .

Зависимость (1), преобразованная с учетом выражений (3), (4), имеет два решения относительно переменной  $u$ . Случай, когда  $u = 0$  не представляет интереса, так как соответствует вершине конической производящей поверхности, которая не участвует в процессе формообразования зубьев. Второе решение является искомым уравнением зацепления.

Зависимость (2) описывает не только боковые поверхности зубьев шестерни, но и участки поверхности дна впадины, формируемые вершинными режущими кромками резцов. Для этого достаточно принять значение половины угла при вершине конуса  $\alpha_0 = 90^\circ$ , превратив его, таким образом, в плоскость.

Для определения геометрических параметров шестерни, инструмента и наладки станка для нарезания зубьев разработана расчетная методика, единая для схем обработки с наклоном инструмента и без него. Она включает в себя:

1 Определение радиуса основания производящей поверхности, обеспечивающего требуемую продольную локализацию пятна контакта в зацеплении.

2 Для положений инструмента, соответствующих формированию зуба производящего плоского колеса, вычисление координат его центра.

3 Расчет высоты зуба производящего плоского колеса, обеспечивающего зазор между вершиной зуба плоского колеса и дном впадины шестерни в рабочем зацеплении.

4 Определение диапазонов варьирования параметров  $\theta$  и  $\varphi_2$ . При этом для параметра  $\theta$  исключаются значения, соответствующие разрывам функции уравнения зацепления.

5 Расчет ширины венца шестерни, обеспечивающей использование в рабочем зацеплении всей ширины боковых поверхностей зуба плоского колеса.

6 Проверку зуба шестерни на подрезание, для чего определяется положение дискриминантных кривых боковых поверхностей зуба шестерни (рисунок 20).

7 Определение приемлемости радиуса неформообразующей стороны инструмента из условия обеспечения припуска на обработку боковых поверхностей зубьев. Особенностью расчета является допустимость срезания части боковых поверхностей зуба шестерни (участки 3 – 6 на рисунке 21), если это не затрагивает активных поверхностей (поз. 1, 2).

8 Определение минимальной вершинной толщины зуба и проверку зубьев на заострение. В этих расчетах также учитывается допустимость срезания части боковых поверхностей зуба шестерни, упомянутого выше.

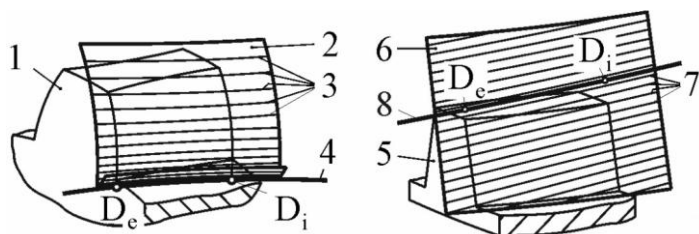


Рисунок 20 – Схемы к проверке на подрезание:

1 – зуб шестерни; 2 – теоретическая боковая поверхность; 3, 7 – мгновенные контактные линии; 4, 8 – дискриминанта; 5 – зуб производящего плоского колеса; 6 – производящая поверхность

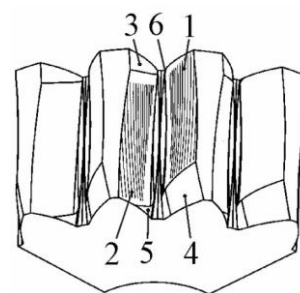


Рисунок 21 – Допустимое

срезание части зуба шестерни:

1, 2 – активные поверхности;

3, 4, 5, 6 – участки срезания зуба

9 Определение приемлемости радиуса неформообразующей стороны инструмента из условия полноты прорезания впадины.

10 Проверку наладки на отсутствие вторичного резания заготовки.

11 Определение значения органических погрешностей дна впадины.

12 Расчет приведенных зазоров в рабочем зацеплении при номинальном положении шестерни и в случае ее установки с осевым смещением.

13 Возможность корректировки параметров шестерни, рабочего зацепления и повторение расчета с новыми исходными данными.

Детальное описание перечисленных выше расчетных методик приведено в [7].



Для проверки полученных зависимостей, расчетных методик и программного обеспечения использовалась технология трехмерного графического моделирования. В программе SolidWorks были созданы модели плоских колес, шестерен и передач (рисунки 22 – 25). Посредством встроенных функций SolidWorks и специализированного приложения было подтверждено отсутствие интерференции зубьев при различных значениях фазы зацепления, созданы анимационные ролики, моделирующие работу передач.

Для автоматизации расчетов на основе разработанных методик было создано программное обеспечение. Результатами его работы являются:

- файлы, содержащие исходные данные и основные выходные параметры ;
- файлы с протоколом работы, содержащие значения всех переменных, за исключением меняющихся при выполнении итераций (для пользователя исследовательского уровня и для упрощения возможной доработки программы);
- файлы, содержащие координаты точек поверхностей зубьев и впадин, поверхностей зацепления, дискриминантных кривых, мгновенных контактных линий, необходимые для графического моделирования передач.

В дальнейшем планируется разработать технологию зубошлифования для предлагаемых передач, доработать расчетные методики, распространив их на передачи с арочной формой зуба.

Передачи, изготовленные по предлагаемой технологии, обладают большинством достоинств традиционных ОСКГП. Прямозубую шестерню можно разгрузить от осевой силы. Влияние на контакт осевых погрешностей установки шестерни можно уменьшить продольной локализацией контакта, либо шестерня может быть самоустанавливающейся. Погрешности установки плоского колеса в осевом направлении незначительно влияют на контакт в передаче. Регулировка при сборке может быть исключена или сильно упрощена.

ОСКГП с дуговой линией зуба по сравнению с традиционными ОСКГП имеют более жесткие ограничения по ширинам венцов колес и уступают им в части универсальности конструктивных решений. Например, не всегда возможно нарезание плоских колес, выполненных заодно с валом, так как должен обеспечиваться доступ инструмента к нарезаемому венцу. Невозможно создание механизмов, в которых две шестерни, зацепляющиеся с плоскими колесами, зацепляются друг с другом.

Достоинством ОСКГП с дуговой линией по сравнению с традиционными ОСКГП является их технологичность в условиях единичного и серийного производств на неспециализированных предприятиях, в том числе при больших размерах плоского колеса. Минимизация финансовых и временных затрат на подготовку производства обеспечивается воз-

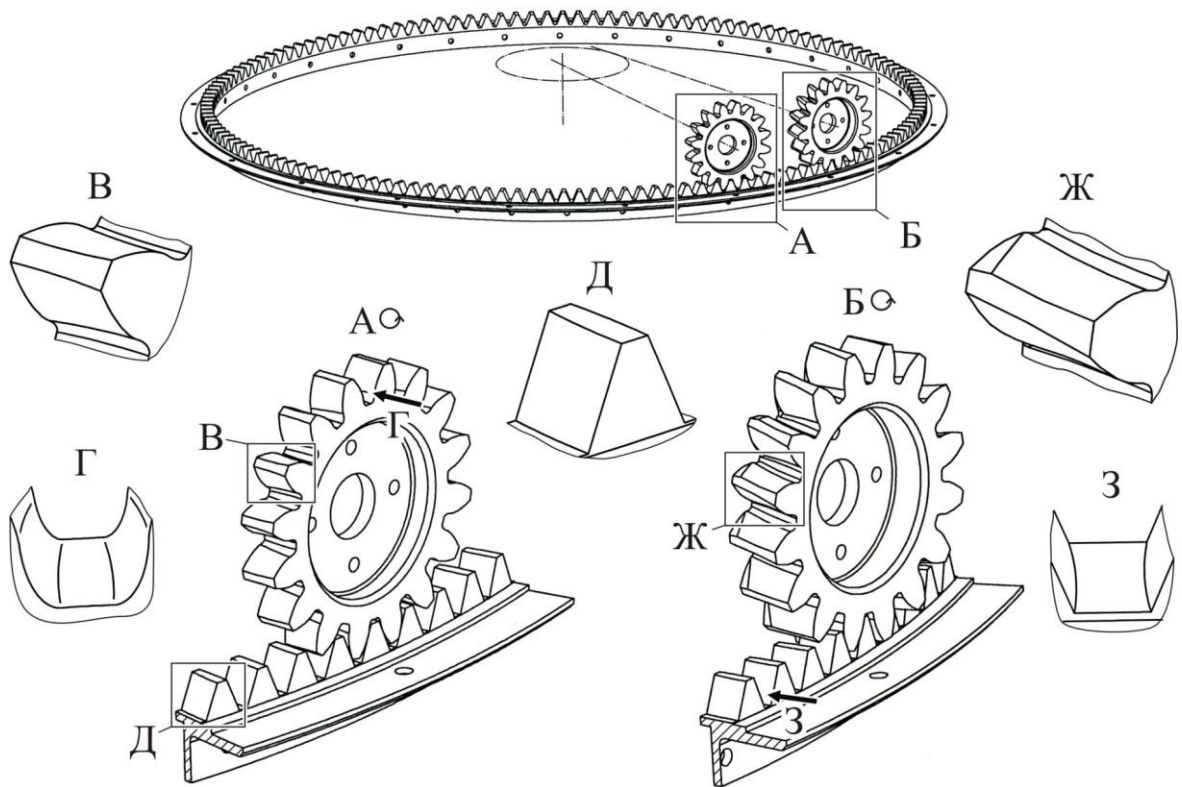


Рисунок 22 – Ортогональные смешанные передачи на основе плоского колеса с прямыми бочкообразными зубьями, нарезанными без наклона инструмента

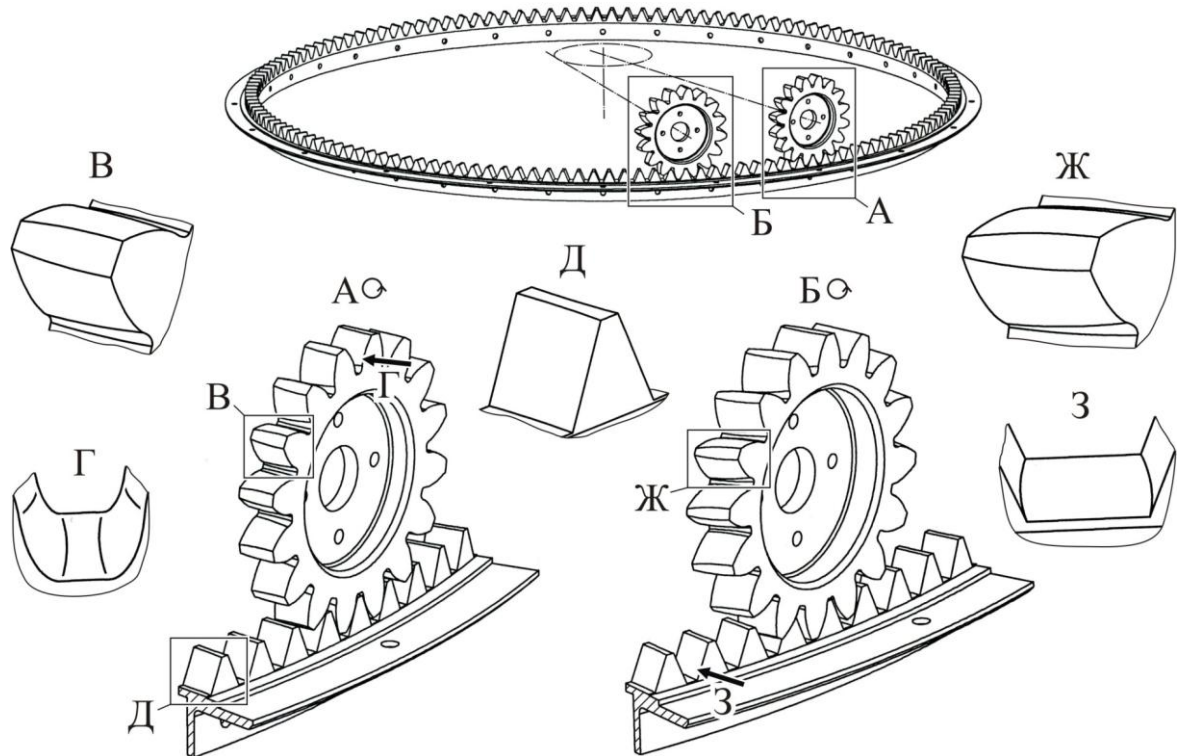


Рисунок 23 – Ортогональные смешанные передачи на основе плоского колеса с прямыми корсетными зубьями, нарезанными без наклона инструмента

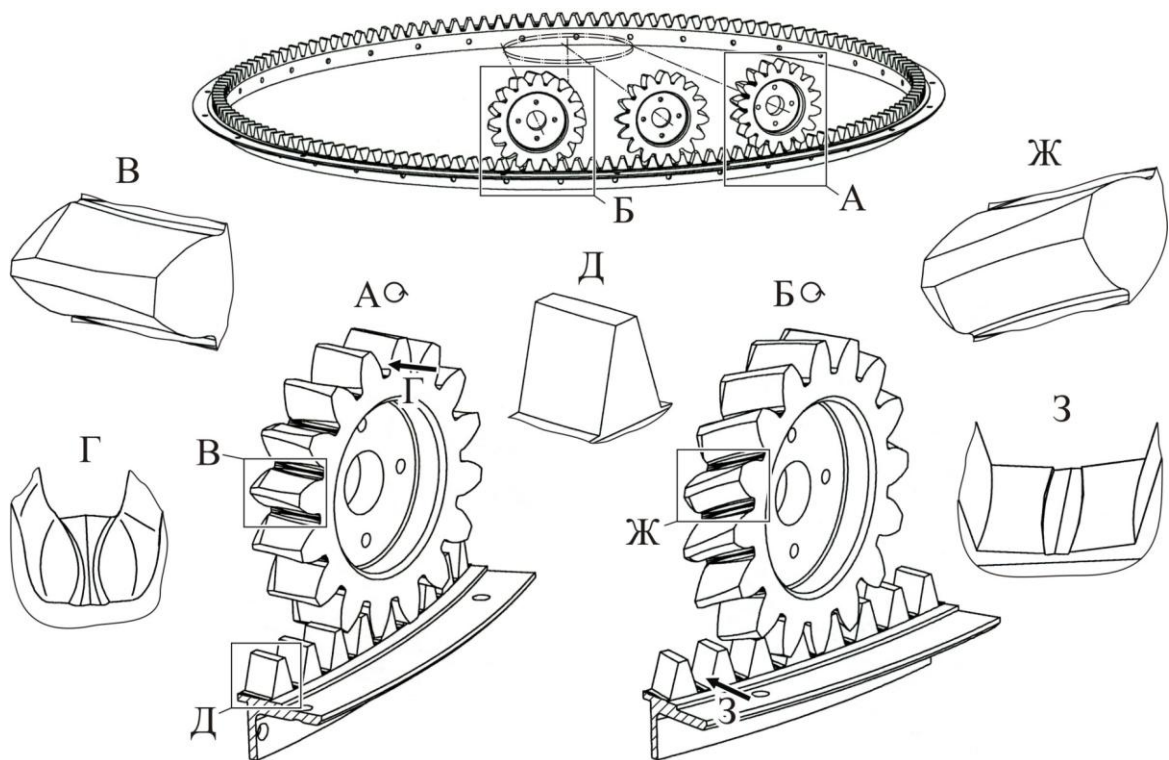


Рисунок 24 – Ортогональные смешанные передачи на основе плоского колеса с тангенциальными бочкообразными зубьями

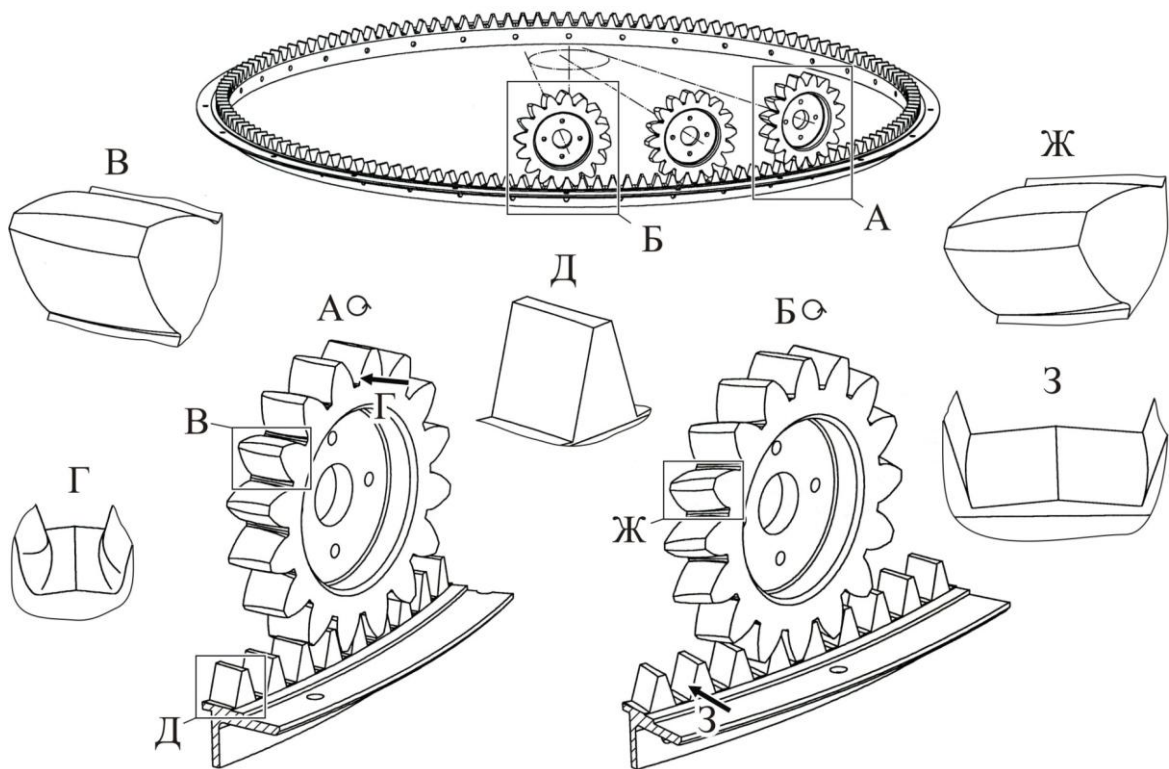


Рисунок 25 – Ортогональные смешанные передачи на основе плоского колеса с тангенциальными корсетными зубьями

возможностью использования:

- серийных фрезерных станков с ЧПУ общего назначения (не зубофрезерных), имеющих на большинстве предприятий;
- стандартного инструмента и несложной технологической оснастки.

Предлагаемая технология превосходит по доступности все известные технологии, в том числе новейшие зарубежные.

В конечном итоге ОСКГП с дуговой линией зуба расширяют арсенал конструкторских решений, что в ряде случаев делает возможным создание более простых и технологичных механизмов.

#### Библиографический список

1 Experimental Evaluation of Face Gears for Aerospace Drive System Applications. NASA Technical Memorandum TM-107227. Army Research Laboratory Technical Report ARL-TR-1109. Handschuh R.F., Lewicki D.G., Heath G.F., Bossler R.B., Heights Jr. H. Prepared for the Seventh International Power Transmission and Gearing Conference sponsored by the American Society of Mechanical Engineers San Diego, California. – 1996. – 9 p.

2 Face Gear Drives: Design, Analysis, and Testing for Helicopter Transmission Applications. American Gear Manufacturers Association. Technical paper 92FTM2. Litvin F. L., Wang J.-C., Bossier R.B., Chen Jr., Y.-J.D., Heath G., Lewicki D.C. – Alexandria, Virginia, 1992. – 11 p.

3 New Developments in Design, Manufacturing and Applications of Cyclo-(Face) Gears. American Gear Manufacturers Association. Technical paper. Basstein G., Sijstra A. – Alexandria, Virginia, 1993. – 12 p.

4 Litvin praised by Boeing Company for contributions to face gearing technology design and manufacturing [Электронный ресурс].

[http://www.me.uic.edu/UIC\\_ME\\_Newis\\_Litvin\\_praised\\_by\\_Boeing.htm](http://www.me.uic.edu/UIC_ME_Newis_Litvin_praised_by_Boeing.htm)

5 New Design and Improvement of Planetary Gear Trains. NASA Contractor Report CR-2004-213101. Army Research Laboratory Contractor Report ARL-CR-0540. Litvin F.L., Fuentes A., Vecchiato D., Gonzalez-Perez I. – 2004. – 26 p.

6 Zoelling M.-R. Un morceau de Singine dans le cosmos / Zoelling M.-R. // La Liberte. – 2005, 14 fevrier – P. 35.

7 Андрианов П.А. Формообразование зубьев колес полуобкатных ортогональных смешанных конических и гиперболоидных передач с дуговой линией зуба: дисс. ... канд. техн. наук / Андрианов П.А. – Тула, 2008. – 283 с.

Андрианов Павел Алексеевич, начальник сектора ГУП Конструкторское бюро приборостроения, к.т.н.,

Тел.: 8-910-704-71-95, e-mail: [AndrianovP@tula.net](mailto:AndrianovP@tula.net)