

УДК 621.914.5

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

## ОСОБЕННОСТИ ДВУХПОЗИЦИОННОГО ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ОАО «НИТЕЛ»<sup>2</sup>**Цель:** Улучшение технологичности, точности и качества обработки зубчатых колес.**Метод:** Анализ технического уровня и опытно-технологические работы.**Результаты:** Подтверждена возможность нарезания зубчатых колес с повышенной нагрузочной способностью универсальными червячными фрезами с повышением точности и качества поверхностей эвольвентного профиля**Область применения:** Машиностроение.*Ключевые слова:* двухпозиционное зубофрезерование, двухпозиционный обкат, нагрузочная способность, точность и качество зубчатых передач, универсальные червячные фрезы.

Зубчатые передачи современных машин отличаются высокой нагрузочной способностью, низкими уровнями вибрации и шума. Улучшение свойств достигают за счет оптимизации формы сопрягаемых зубьев по критериям нагрузочной способности и качества зацепления. Синтез оптимизированного эвольвентного зацепления выполняют на всей области его существования, которая значительно превосходит блокирующие контуры стандартного исходного производящего контура (ИПК) [1].

ИПК по ГОСТ 13755-68 и ГОСТ Р 50531-93 не пригодны для достижения предельных показателей нагрузочной способности рабочего зацепления. Большая толщина выступов по граничной прямой и большие углы профиля ограничивают высоту и толщину формируемых зубьев, коэффициент перекрытия и прочность зацепления.

В интересах конкурентоспособности производители применяют специальный зуборезный инструмент с нестандартными ИПК и соглашаются с ростом затрат на подготовку производства. Подобная практика утвердилась в авиационной и автомобильной промышленности, где дополнительные затраты компенсируют эффективностью трансмиссий и комфортом пассажиров. В других отраслях: станкостроении, судостроении, тракторостроении и т. д. – оптимизированные передачи имеют ограниченное применение, что объясняют технологической преемственностью и ограниченными инвестиционными возможностями.

Однако задача применения универсального инструмента в производстве зубчатых передач с улучшенными свойствами имеет свое решение, которое позволяет преодолеть трудности модернизации.

В технологии машиностроения известен способ нарезания зубьев стандартным инструментом, который позволяет формировать эвольвентный профиль в широком диапазоне геометрических параметров. Возможно, первое описание способа дает К.А. Корнилов в книге «Производство зубчатых колёс» [2] и рекомендует его для ремонтного, единичного и мелкосерийного производства. В 1933 г. автор книги реализовал способ «двойного нарезания» в ремонтном производстве Челябинского тракторного завода при изготовлении дробномодульных (двухмодульных) колёс стандартным инструментом.

Суть способа заключается в том, что после окончания предварительного нарезания разъединяют кинематическую цепь, связывающую заготовку с инструментом. Заготовку поворачивают относительно инструмента на расчетную величину угла, соответствующего уменьшению толщины зуба, и нарезают второй и последний раз. Поворот заготовки может быть заменен соответствующим тангенциальным смещением фрезы.

Основы теории и расчетов зубчатых передач с использованием как радиального, так и тангенциального смещения ИПК разработаны и опубликованы И.П. Ивановым [3].

С дополнительным тангенциальным смещением стандартного инструмента выполнены зубья шестерни и колеса в эвольвентной передаче внутреннего зацепления [4], запатентованной производственным объединением "Электростальтяжмаш" в 1994 году авторы А.А. Ковтушенко, С.А. Лагутин, В.В. Мунтян.

В два этапа с использованием радиального и тангенциального смещений нарезают зубья в способах изготовления эвольвентных звездочек зубчатых цепей, которые запатентованы Кубанским государственным технологическим университетом в 2006 году авторы А.А. Петрик, С.Б. Бережной, О.И. Остапенко, А.А. Война [5, 6].

В работах [7,8] описан метод конструктивно-технологической оптимизации геометрических параметров зацепления, который включает совместный синтез рабочего и станочных зацеплений с применением двухпозиционного обката заготовок универсальным ИПК с постоянными параметрами.

По своим результатам двухпозиционный обкат эквивалентен применению ИПК с переменной толщиной выступа (рис. 1). В первой позиции фрезеруют зубья увеличенной толщины с необходимым радиальным смещением ИПК, причем одна из сторон зубьев может быть сформирована окончательно. Необходимую толщину зубьев обеспечивают настройкой второй позиции обката за счет тангенциального смещения инструмента или углового смещения заготовки (см. рис. 2).

Общая технологическая особенность перечисленных технических решений: обработка зубьев в двух позициях обката. В первой позиции реализуют радиальное смещение ИПК, а во второй – тангенциальное.

В связи с отсутствием общепринятого наименования способа мы применяем термин, который отражает эту общую особенность зубообрабатывающих операций: «двухпозиционный обкат» и «двухпозиционное зубофрезерование». Отметим, что согласно ГОСТ 3.1109-82 (п. 55), позиция – фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования при выполнении определенной части операции.

Двухпозиционное зубофрезерование имеет ряд особенностей, которые следует учитывать в технологическом проектировании и производстве оптимизированных передач.

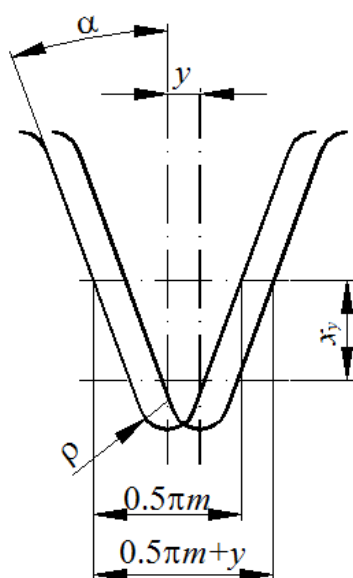


Рис. 1. Универсальный ИПК

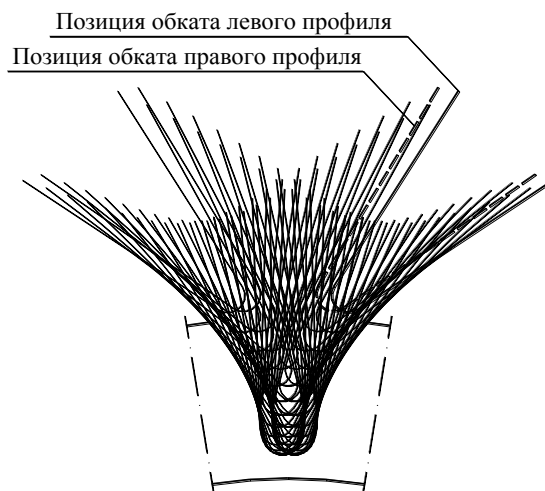


Рис. 2. Двухпозиционный обкат

Форма универсального ИПК определяется двумя параметрами: углом профиля  $\alpha$  и радиусом округления головки  $r$ . Позиции ИПК задают радиальным  $x_y$  и тангенциальным  $y$

смещениями. Коэффициенты смещений определяют решением задачи конструктивно-технологической оптимизации, например по методике [6,7]. Оптимальный выбор смещений исключает эффекты подрезания, заострения, интерференции и сокращения толщины зубьев.

Оптимизированные передачи имеют равнопрочные зубья с предельно возможными высотами, толщинами и коэффициентами перекрытия. Некоторое снижение коэффициента формы высоких зубьев компенсируется лучшим перекрытием и податливостью под нагрузкой так, что общая нагрузочная способность зацепления возрастает. Для реализации двухпарного зацепления степень точности не должна превышать шестую степени по ГОСТ 1643 - 81.

В станочных зацеплениях параметры универсального ИПК должны обеспечить коэффициенты перекрытия большие, чем в рабочем зацеплении оптимизированных передач. Из схемы станочного зацепления (рис. 3) следует, что параметры ИПК должны удовлетворять соотношениям

$$\varepsilon_{\alpha 0} = \left( \operatorname{tg} \alpha_{a0} - \operatorname{tg} \alpha_t + \frac{\pi}{z \cos^2 \alpha_t} + \rho^* \frac{2}{z \cos \alpha_t} \right) \frac{z}{2\pi} \geq \varepsilon_{\alpha}, \quad (1)$$

$$\alpha_{a0} = \arccos \left( \left( \frac{1}{\cos \alpha_t} + \left( \frac{\pi}{z \cos \alpha_t} - 4 \frac{\rho^*}{z} \right) \operatorname{tg} \alpha_t - \left( \frac{\pi}{z \cos \alpha_t} + 2 \frac{\rho^*}{z} \right) \operatorname{tg} \alpha_t \right)^{-1} \right), \quad (2)$$

где 0 – индекс станочного зацепления;  $\varepsilon_{\alpha}$  – коэффициент перекрытия в рабочем зацеплении;  $\varepsilon_{\alpha 0}$  – коэффициент перекрытия в станочном зацеплении;  $\alpha_{a0}$  – предельный угол профиля на окружности вершин нарезаемых колес;  $\alpha_t$  – угол профиля ИПК в торцовой плоскости зубчатого колеса;  $\rho^*$  – модульный коэффициент радиуса округления ножки ИПК в долях модуля;  $z$  – число зубьев нарезаемого колеса.

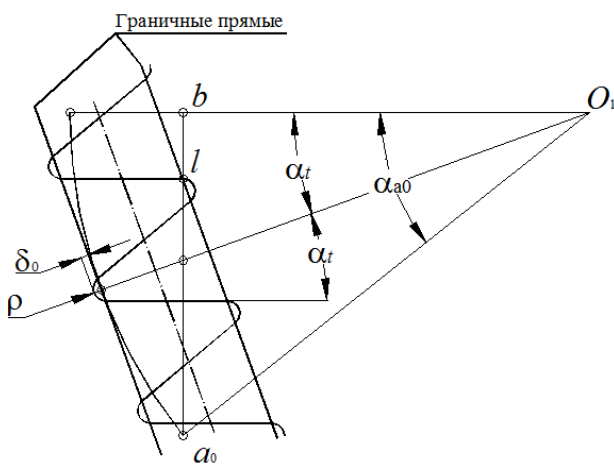


Рис. 3. Схема станочного зацепления

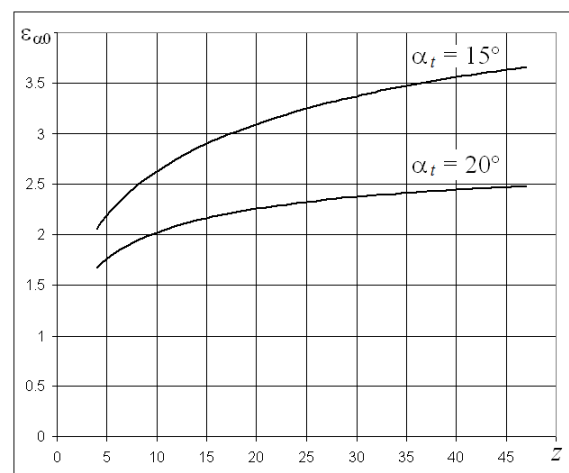


Рис.4. Зависимость  $\varepsilon_{\alpha 0}$  от  $z$

На рис. 4 показаны зависимости  $\varepsilon_{\alpha 0}$  от числа зубьев  $z$  и угла профиля  $\alpha_t$ , из которых следует, что реализация зацепления с коэффициентом перекрытия  $> 2$  возможна при  $\alpha_t < 20^\circ$ . С учетом роста угла профиля ИПК в торцовом сечении косозубых колес рациональные значения углов профиля составляют 12 - 15°.

Радиальный зазор  $\delta_0$  в станочном зацеплении должен быть больше высоты округления ножки ИПК,

$$\delta_0^* \geq \rho^* (1 - \sin \alpha_t), \quad (3)$$

а угол профиля  $\alpha_a$  на окружности вершин нарезаемых колес должен быть меньше угла  $\alpha_{a0}$ .

Радиус округления головки универсального ИПК и его толщина по граничной прямой существенно меньше, чем у стандартных контуров, что обеспечивает место под припуск вто-

рой позиции обката.

Отношение толщин зубьев на граничной прямой универсального и стандартных ИПК составляет 0,57 (57%) для ГОСТ 13755-68 и 0,79 (79%) для ГОСТ Р 50531-93. Минимальное значение радиуса округления соответствует эмпирическому условию стойкости зуборезного инструмента  $\rho^* = 0,25 \dots 0,3$ .

Размеры для контроля взаимного положения разноименных профилей зубьев можно рассчитать по формулам ГОСТ 16532-70, используя приведенные коэффициенты смещения:

$$x_{1,2}^* = x_{y1,2}^* + \frac{y_{1,2}^*}{2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (4)$$

В первой позиции обката выполняется черновое и получистовое зубофрезерование. Зубья фрезы работают всеми режущими кромками. Припуск под получистовое зубофрезерование показан на рис. 5. Отношение радиальной  $t_r$  и нормальной  $t_n$  толщин припуска определяется выражением

$$\frac{t_r}{t_n} = \frac{1}{\sin \alpha_t}, \quad (5)$$

Уменьшение угла профиля ИПК приводит к увеличению разности толщин стружки, срезаемой вершинными и боковыми режущими кромками. Из графика на рис. 6 следует, что нагрузка на вершинную кромку фрезы с универсальным ИПК будет выше, чем у стандартных фрез.

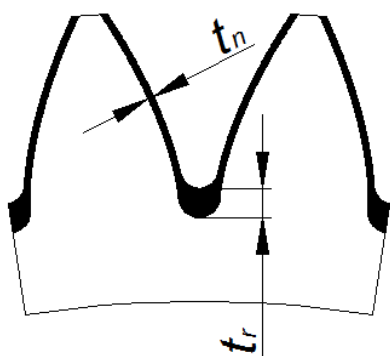


Рис. 5. Припуск под получистовое зубофрезерование в первой позиции обката

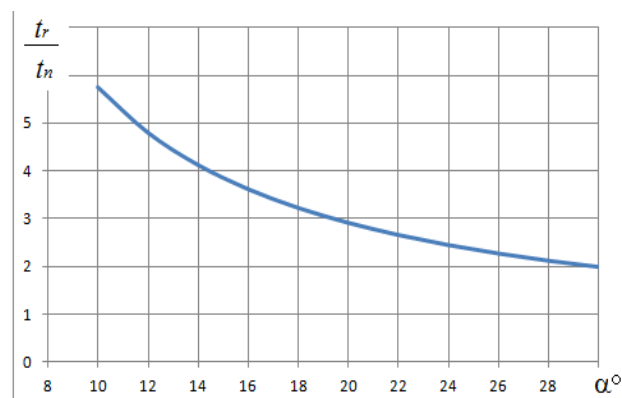


Рис. 6. Зависимость отношения радиальной и нормальной толщин припуска от угла профиля

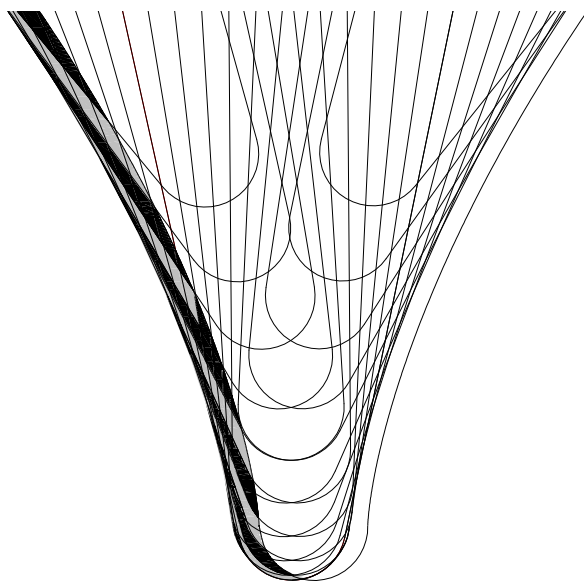
Во второй позиции обката выполняется чистовое фрезерование рабочей стороны зубьев. Припуск под чистовое зубофрезерование определяется величиной тангенциального смещения  $u$ . Зубья фрезы работают одной боковой режущей кромкой и прилегающей частью вершинной кромки. Резание происходит по одной линии станочного зацепления.

На рис. 7 и рис. 8 показаны нормальные сечения удаляемых слоев припуска на входной и выходной стороне выступа ИПК. На входной стороне формирование зуба начинается боковой режущей кромкой, а заканчивается вершинной кромкой. На выходной стороне формирование профиля зуба начинается вершинной режущей кромкой и заканчивается боковой кромкой.

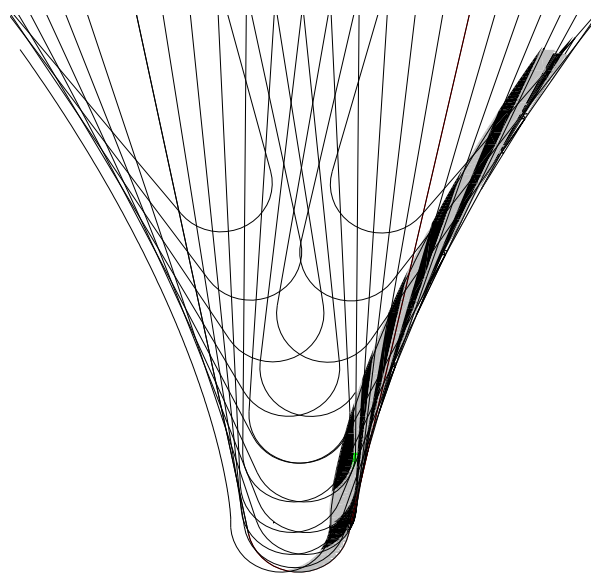
Первый вариант настройки позволяет разгрузить вершинную кромку червячной фрезы и представляется благоприятным для продления стойкости инструмента. В этом варианте настройка второй позиции зубофрезерования выполняется вращением заготовки в сторону противоположную вращению стола.

В целях улучшения качества боковых поверхностей возможно применение многопозиционного обката, который становится необходим, когда к противоположным сторонам

зубьев предъявляются одинаковые технические требования. В этом случае припуск под вторую позицию делится между сторонами, а обкат производится в трех позициях.



**Рис. 7. Сечения срезаемых слоев припуска на входной стороне ИПК**



**Рис. 8. Сечения срезаемых слоев припуска на выходной стороне ИПК**

Смена позиций не оказывает влияния на станкоёмкость и трудоемкость зубофрезерования и без затруднений реализуется в станках с числовым программным управлением.

Если зубья колес шлифуются, то ИПК червячных фрез выполняют с протуберанцем. В общем случае протуберанец может подрезать значительный участок эвольвентной части профиля. Однако для оптимизированных передач величина подреза невелика, так как протуберанец формирует профиль вблизи начальной окружности станочного зацепления и огибающая положений протуберанца близка к его форме.

Экспериментальные работы по исследованию двухпозиционного зубофрезерования [9] были выполнены на зубофрезерном полуавтомате модели 5К32П универсальной червячной фрезой с 12 стружечными канавками, четырьмя заходами и следующими параметрами ИПК:  $\alpha = 12^\circ$ ,  $\rho = 0,65$  мм,  $m = 2,1167$  мм.

Для установки заготовок применялась многоступенчатая оправка с посадочными шейками под все зубчатые колеса технологической группы. Тангенциальное смещение червячной фрезы производилось осевым перемещением суппорта, а угловое смещение заготовки посредством специального позиционера [10] (рис. 9).

Позиционер содержит оправку 1 с местами под заготовку 2, поводок 3, опорный уголок 4, микрометрическую головку 5, кронштейн 6, клемму 7, болт-стойку 8, гайки 9 крепления опорного уголка, и детали крепления 10. Поводок 3 крепится к оправке 1 и опорному уголку 4. Последний закреплен на столе станка через продолговатое отверстие посредством болта-стойки 8 и гаек 9. Корпус микрометрической головки 5 закреплен на опорном уголке посредством кронштейна 6, а микрометрический винт соединен клеммой 7 с болтом-стойкой.

Настройка второй позиций обката производится после отвода инструмента от заготовки 2 и снятия затяжки с гайки 9. Вращением микрометрического винта поворачивают заготовку на расчетную величину смещения позиций обката. После чего опорный уголок 4 затягивают гайками 9 на болте-стойке 8. Позиционер позволяет смещать заготовку в двух направлениях и выполнять обработку обеих сторон зубьев.

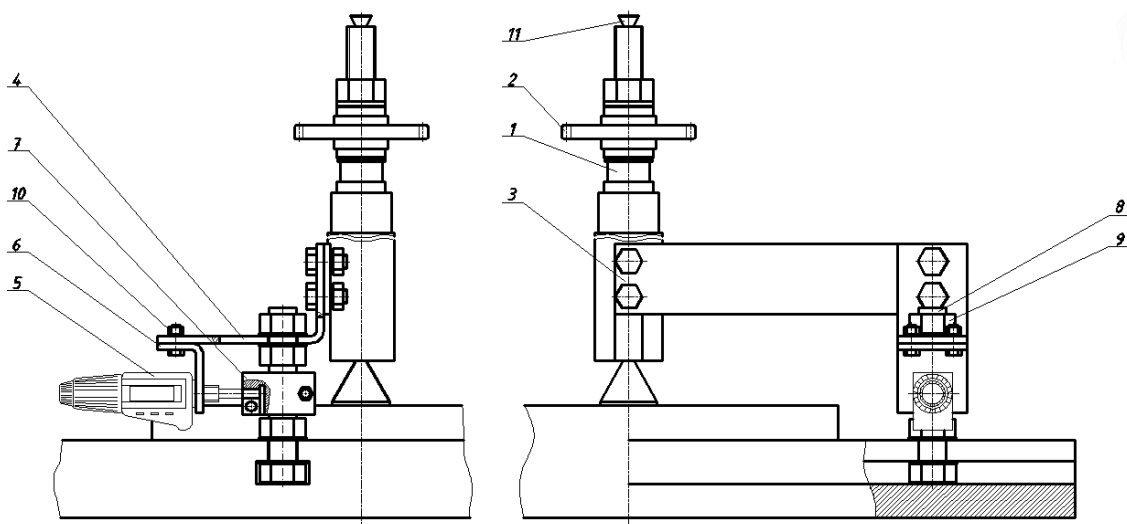


Рис. 9. Позиционер

Зубофрезерование производилось в три этапа: черновой, получистой с радиальным припуском 1 мм и чистовой с тангенциальным смещением 0,32 мм. Черной и получистой этапы выполнялись в первой позиции обката, а чистовой - во второй.

Таким образом, одна сторона зуба была обработана традиционным способом в первой позиции обката, когда в процессе резания участвовали все режущие кромки зуба червячной фрезы. Противоположная сторона зуба прошла обработку во второй позиции обката, когда в процессе резания участвовали режущие кромки одной стороны зубьев фрезы.

Контроль опытных образцов показал, что погрешность профиля и шероховатость на стороне зуба, прошедшей обработку во второй позиции обката, вдвое меньше, чем на противоположной стороне зуба после традиционной обработки.

Погрешности направления зуба и шага зацепления на противоположных профилях зубьев оказались одинаковыми.

Выполненные экспериментальные работы подтвердили возможность производства зубчатых передач с улучшенными свойствами способом двухпозиционного зубофрезерования.

Стойкость новых универсальных червячных фрез не снизилась относительно стандартизованных аналогов, а новая технологическая оснастка оказалась несложной и вполне работоспособной.

Трудоемкость и станкочасовое время операций двухпозиционного зубофрезерования не превышают аналогичные показатели традиционной обработки.

Достигнуто улучшение технологичности зубчатых колес с повышенной нагрузочной способностью за счет применения универсальных, а в перспективе стандартных червячных фрез с постоянными параметрами ИПК.

Двухпозиционное зубофрезерование позволяет снизить погрешности профиля и шероховатость рабочих поверхностей зубьев как в производстве зубчатых колес стандартного исходного контура, так и в производстве передач с улучшенными свойствами.

#### Библиографический список

1. **Вулгаков, Э.Б.** Теория эвольвентных зубчатых передач / Э.Б. Вулгаков. – М.: Машиностроение, 1995. – 320 с.
2. **Корнилов, К.А.** Производство зубчатых колес. Мелкосерийное и единичное производство цилиндрических, конических, червячных, прямозубых и косозубых колёс / К.А. Корнилов. – М.: Машгиз. 1947. – 244 с.
3. **Иванов, И.П.** Зубчатые передачи с комбинированным смещением: Основы теории и расчетов. Л, Издательство Ленинградского университета / И.П. Иванов, 1989. – 128 с.

4. Пат. 2025614 РФ, МПК F16H1/10, F16H3/40. Эвольвентная зубчатая корригированная передача внутреннего зацепления / Производственное объединение "Электростальтяжмаш" // Изобретение. Официальный бюл. 1994.
5. Пат. 2110374 РФ, МПК B23F1/06, F16H55/30. Способ изготовления эвольвентных звездочек / Кубанский государственный технологический университет // Изобретение. Официальный бюл. 1998.
6. Пат. 2314900 РФ, МПК B23F5/22. Способ изготовления эвольвентных звездочек для зубчатых цепей / Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кубанский государственный технологический университет" (ГОУВПО "КубГТУ") // Изобретения. Официальный бюл. 2008. №2.
7. Пат. 2412026 РФ, МПК B23F5/14, B23F5/14. Способ образования зубчатых передач двухпозиционным обкатом / А.Н. Петровский // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюл. 2011. № 5.
8. **Петровский, А.Н.** К задаче оптимизации параметров эвольвентного зацепления // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. С. 75–87.
9. **Дружинин, Г.А.** Экспериментальное исследование двухпозиционного зубоврезерования // Нижегородская сессия молодых ученых. Технические науки: мат. докладов. – Н. Новгород., 2011. С. 19–22.
10. Пат. на полезную модель 128848 РФ, МПК B23F23/12, B23F23/12. Позиционер / Г.А. Дружинин, А.Н. Петровский, С.В. Воронков // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюл. 2013. № 16.

*Дата поступления  
в редакцию 11.12.2014*

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

## **SPECIAL ASPECTS OF TWO-POSITION GEAR HOBGING**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev<sup>1</sup>,  
JSC "NITEL"<sup>2</sup>

**Purpose:** Improvement of producibility, accuracy and quality of gear wheel treatment.

**Methods:** Technical level analysis and experimental and technological works.

**Results:** The possibility of cutting gear wheels with extended loading capacity by means of universal wormwheel hobs providing for higher accuracy and involute profile surface quality.

*Key words:* two-position gear hobbing, two-position generation, loading capacity, accuracy and quality of toothed gearing, universal wormwheel hobs.