

Е.В. Мироненко, В.Ф. Шаповалов, А.А. Клочко, С.Ю. Палашек, Е.В. Остапович

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА ЗУБООБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗУБЧАТЫХ ВЕНЦОВ

Разработаны конструкторско-технологические способы с целью повышения производительности и качества зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов на основании анализа геометрии зацепления и профиля зубьев с учетом установления зависимости величины отклонения эвольвентной кривой профиля зуба. Отклонение от касательной к эвольвентной кривой профиля зуба, проведенной в точке, расположенной на делительной окружности при модуле свыше 25 мм и числа зубьев $Z_k \geq 130$ укладываются в допуски на изготовление колес с эвольвентным зацеплением по 9-й степени точности. В рассматриваемых случаях эвольвентный профиль зуба может быть заменен на прямолинейный, что позволяет значительно повысить эффективность технологического процесса зубофрезерования. Аналитически обосновано, что с прямолинейным профилем зубьев на колесе при $m=25$ мм и выше и числе зубьев $Z_k = 130-200$ необходимо вводить в зацепление шестерни, имеющие сопряженный профиль зубьев.

Ключевые слова: обработка отверстий, комбинированный осевой инструмент, технологический процесс, концентрация операций

Введение. При нарезании зубьев на колесах, диаметр которых превышает $\varnothing 5000$ мм, а модуль зацепления $m \geq 25$ мм, производительность операции зубонарезания очень низкая из-за нежесткой системы СПИД.

Зубчатые передачи большого диаметра с крупным модулем используются в механизмах поворота уникальных машин, работающих в горнодобывающей, строительной, и других отраслях промышленности. Примером могут служить роторные комплексы, экскаваторы и драглаины с большой ёмкостью ковша (4-100 цементные угле и рудоразмольные мельницы большой производительности и др. как правило, в этих машинах применяются цилиндрические тихоходные ($V_{\text{окр}}=1$ м\мин) крупномодульные ($m=20+60$ мм) зубчатые колеса ($Z_x=120+350$), диаметр которых достигает 5-19 м. Трудоемкость зубофрезерования подобных колес только на 5 заводах - ПАО "НКМЗ" ПАО "УЗТМ" ПАО «Волгоцемтяжмаш», ПАО "СЗТМ" г. Сызрань и ПАО «Сибтяжмаш» - составляет более 100 тыс. нормо-часов. Учитывая большую потребность в таких зубчатых колесах, актуальной задачей является изыскание путей повышения производительности и качества выполнения операций зубообработки.

Анализ последних исследований и литературы. Известные в отечественной и зарубежной литературе методы черновой обработки зубьев на крупногабаритных колесах сводятся к тому, чтобы максимально сократить время на удаление металла из впадин зубьев. Достигается это различными способами, например: путем фрезерования впадины пальцевой

фрезой; дисковыми профильными и черновыми фрезами; сверлением отверстий у основания зуба и дальнейшей обработкой впадины пальцевой фрезой; дисковыми пилами или строганием на долбежном или строгальном станке; отливкой черного зуба на венцах и др. Наиболее производительным способом зубообработки крупногабаритных венцов является метод трепанации зубьев, когда черновое нарезание осуществляется двумя дисковыми прорезными фрезами, при этом часть металла впадины вырезается и выпадает в виде отдельных кусков, а чистовая обработка зубьев осуществляется одновременно двумя торцовыми фрезами. Оба вида инструментов могут быть оснащены современными твердосплавными пластинками или режущими элементами из сверхтвердых материалов [1, 2]. Для осуществления такой технологии зубообработки тихоходные зубчатые венцы 9-11 степеней точности по ГОСТ 1643-81 с числом зубьев свыше 130 целесообразно изготавливать с прямолинейным профилем зубьев. При этом отклонения их профиля от эвольвентного не превышают допуска на профиль зубьев согласно ГОСТ 1643-81

Конструкторско-технологические способы. Сопрягаемые с крупногабаритными зубчатыми колесами шестерни могут иметь как эвольвентный профиль зубьев, так и сопряженный, рассчитываемый по известным методикам. Для черновой и чистовой обработки зубьев спаренными инструментами необходимо использовать специальный двухшпиндельный фрезерный суппорт, с углом наклона шпинделей $\alpha = 12^\circ$ (рис. 1) и схема установки дисковых прорезных и торцевых чистовых фрез (рис. 2).

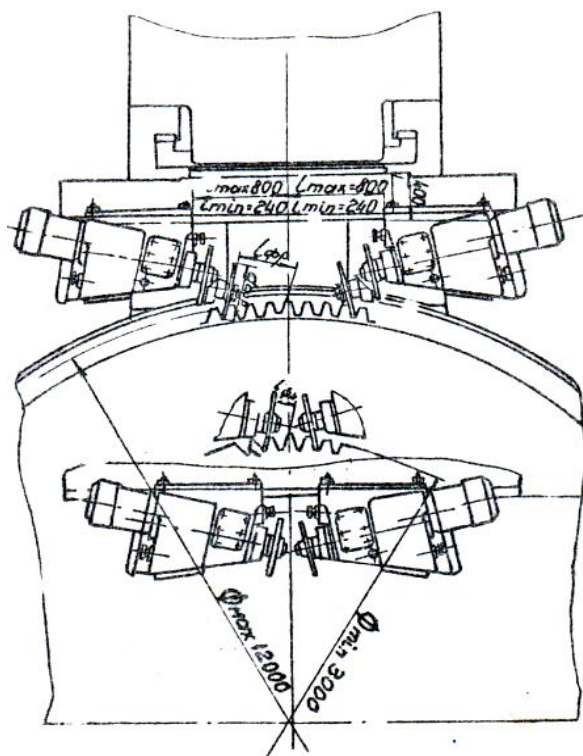


Рис.1 – Схема двухшпиндельного суппорта к вертикально-зубофрезерным станкам мод. 5В345П, 5В348, 5В348/12,5, КУ-279

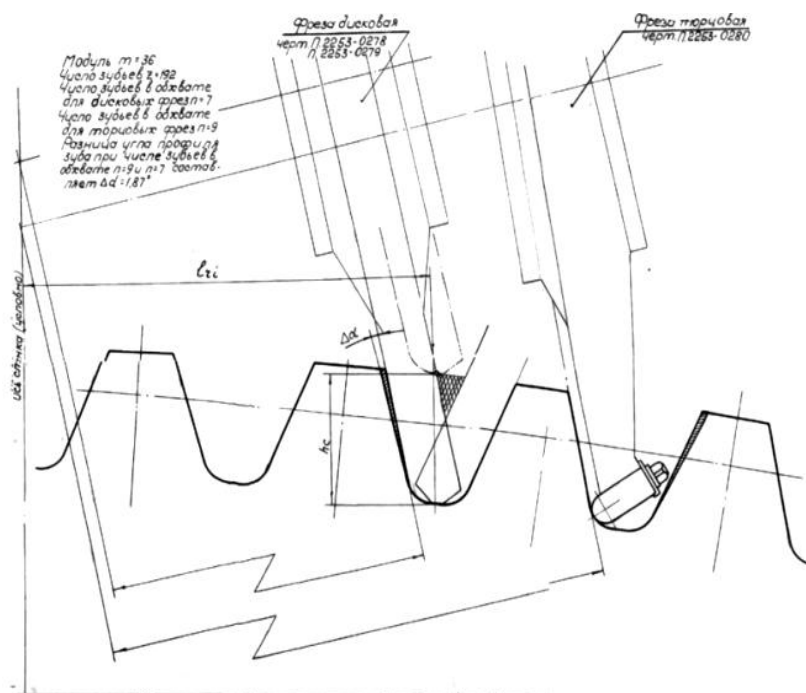


Рис. 2 – Схема установки дисковых прорезных и торцевых чистовых фрез

При черновой и чистовой обработке зубьев по рассматриваемой технологии угол профиля зубьев венца (рис. 3) определяется по формуле

$$\alpha_0 = \alpha_k + \frac{180^\circ}{\pi} (Z_{nIII} - 1) - \Delta\psi, \quad (1)$$

где α_k - угол наклона шпиндельных осей фрезерных головок станка в горизонтальной плоскости.

Z_{nIII} - число охватываемых зубьев венца при чи-

стой обработке торцевыми фрезами.

Рекомендуется назначать такое значение Z_{nIII} , при котором профильный угол зубьев имеет минимальное отличие от 20° .

$\Delta\psi$ - половина углового наименьшего обязательного утонения зуба

$$\Delta\psi = \psi_1 - \psi_2, \quad (2)$$

где

$$\sin \psi_1 = \frac{s_2}{2R_2} = \frac{\pi m}{4v_2} \quad (3)$$

$$\sin \psi_2 = \frac{s_2 - \delta_1 S}{2r_2} \quad (4)$$

Угол профиля впадины между зубьями определяется по формуле

$$\eta_0 = \alpha_k + \frac{180^\circ}{Z} Z_{nIII} + \Delta\psi \quad (5)$$

Угол зацепления передачи, зубчатый венец которой имеет зубья с прямолинейным профилем, определяется по зависимости

$$\alpha_w = \alpha_0 + \psi_2 \quad (6)$$

Рекомендуемое оптимальное число охватываемых инструментами зубьев венца Z_{nIII}
Число зубьев в охвате Z_{nIII} приведены в табл. 1.

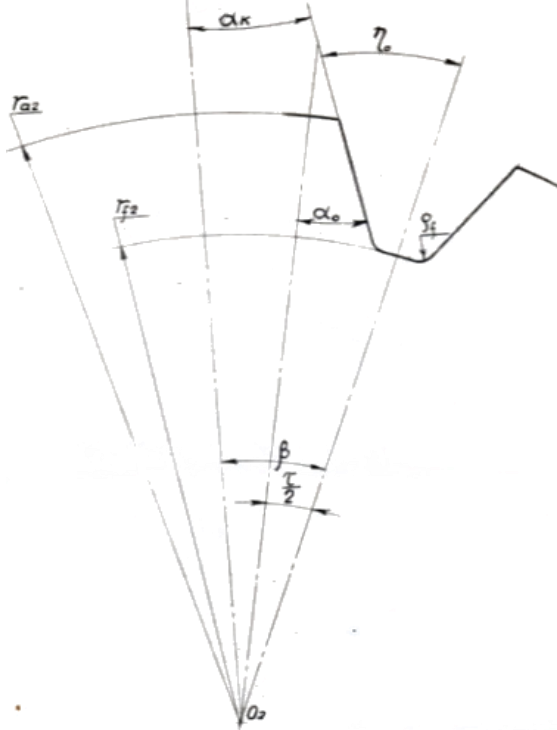


Рис. 3 – Угловые величины зубьев с прямолинейным профилем

Таблица 1 – Рекомендуемое оптимальное число охватываемых инструментами зубьев венца Z_{nIII}

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Число зубьев колеса | 46 | 68 | 91 | 113 | 136 | 158 | 181 | 203 | 226 | 242 |
| | 67 | 90 | 112 | 135 | 157 | 180 | 225 | 225 | 242 | 264 |
| Число охватываемых зубьев Z_{nIII} | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |

Согласно ГОСТ 1643-56 отклонения теоретического профиля зуба допускаются на величину. Допуск в микронах на профиль эвольвентного зуба прямозубого колеса 7-й степени точности рассчитывается по формуле:

$$\delta_f = 0,25d + 1,25m + 15, \quad (7)$$

где d – делительный диаметр. m – модуль зубьев.

Для колес 9-й степени точности вводится поправочный коэффициент $e=1.58^2$

Выразим диаметр через модуль и число зубьев колеса, тогда формула для подсчета δ_f

$$\delta_f = [(0.25Z_k + 1,25)m + 15] * 1.58^2 \quad (8)$$

Как видно, величина допуска δ_f увеличивается с увеличением модуля и числа зубьев колеса, тогда как отклонение прямолинейного профиля от эвольвентного для тех же модулей и чисел зубьев уменьшается с увеличением числа зубьев (рис. 4). Пересечение кривых, характеризующих допустимые и фактические отклонения профиля зубьев одного и того же модуля, происходит при условии, когда $\delta_f = \Delta_\varepsilon = \Delta_i$ (точки 1, 2 и 3). Следовательно, для зубчатых колес вправо от кривой 1-8 возможно назначать прямолинейный профиль зубьев. При этом теоретический профиль прямолинейного зуба укладывается в поле допуска на неточность изготовления профиля зубьев по ГОСТ 1643-56.

Учитывая неизбежные отклонения прямолинейного профиля, получаемого при зубофрезеровании, от теоретического, а также отклонения профиля сопряженной шестерни, ужесточим полученные допускаемые значения на 40% (см. пунктирную кривую 1'-1'). Зубчатые колеса, соответствующие области, расположенной вправо от пунктирной кривой, рекомендуются изготавливать с прямолинейным профилем, а шестерни, сопряженные с ними, с эвольвентным профилем зубьев того же угла зацепления. Таким образом, зубчатые колеса с числом зубьев 200 и более можно изготавливать с прямолинейным профилем и сопрягаемую с ними шестерню с эвольвентным профилем того же угла зацепления.

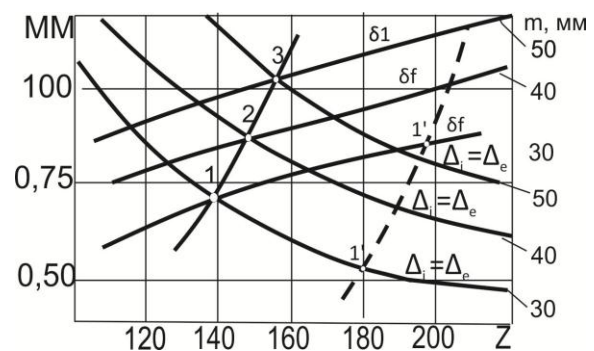


Рис. 4 – График применимости прямолинейного профиля зубьев.

Расчеты показывают, что для скорректированных зубчатых колес отклонения получаются меньшими по сравнению с некорректированными. Геометрия профиля зубьев шестерен при сопряжении их с прямолинейным профилем зуба зависит от числа зубьев колеса. Как показали исследования, колеса с числом зубьев $Z_k \geq 200$ могут работать в паре с шестернями

эвольвентного профиля. Если колеса с числом зубьев $Z_k \geq 200$ и прямолинейным профилем зубьев нарезаются методом трепанации с углом зацепления отличным от 20° , то профиль зубьев шестерен выполняется эвольвентным, и расчет его производится с учетом угла зацепления колеса. Профиль зубьев, шестерен, сопрягаемых с колесами, имеющими число зубьев в пределах от $Z_k = 130$ до $Z_k = 200$, должен быть сопряженным с прямолинейным профилем зубьев колеса.

На рис. 5 показана конструкция сборных дисковых прорезных фрез, оснащенных твердосплавными неперетачиваемыми пластинками круглой формы.

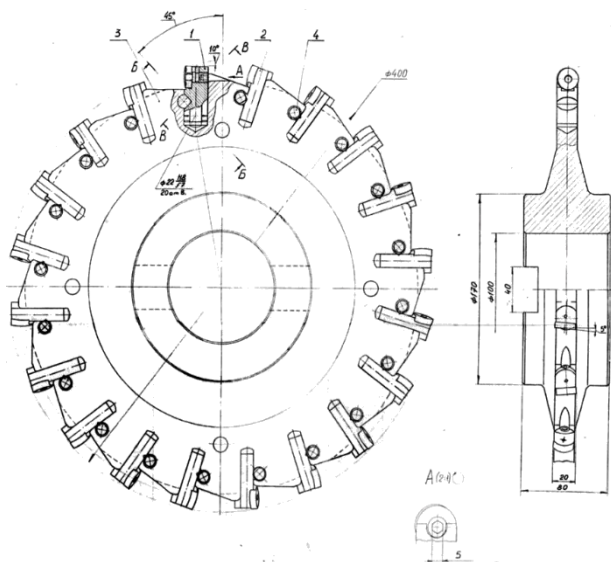


Рис. 5 – Дисковая прорезная фреза

Этими фрезами производится одновременно черновая обработка боковой поверхности зубьев и чистовая дна впадины зубьев (рис.1). При этом минутная подача инструментов может составлять 300-400 мм/мин. Рекомендуемые конструктивные параметры фрез приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Конструктивные параметры дисковых фрез

| Размер фрезы, мм | | Модуль, мм | Число нарезаемых зубьев Z_k |
|------------------|--------|------------|-------------------------------|
| Диаметр | Ширина | | |
| 400 | 28 | 25-28 | X) |
| | | 30 | 20-210 90-210 |
| 450 | 35 | 30 | 30-90 |
| | | 32-36 | 30-210 |
| | | 40 | 150-210 |
| 500 | 38 | 40 | 30-150 |
| | | 42-45 | 30-210 |
| | | 50 | 170-210 |
| 550 | 40 | 50 | 30-170 |
| | | 55 | 30-210 |
| | | 60 | 95-210 |

X) - в случае чернового нарезания шестерни

На рис. 6 показана сборная конструкция чистовых торцевых фрез, оснащенных твердосплавными неперетачиваемыми пластинками круглой формы.

Эти фрезы отличаются от торцевых стандартных фрез лишь конструктивными размерами, которые должны быть согласованы с размерами впадины зуба.

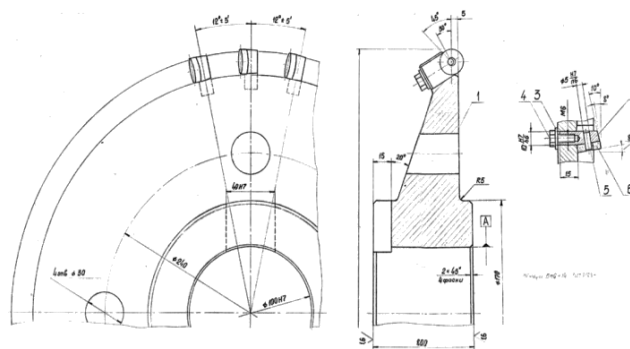


Рис. 6 – Торцевая фреза для обработки зубьев

Установка их на зубофрезерном станке производится так же, как и дисковых фрез (рис. 1). Рекомендуемые конструктивные элементы торцевых фрез для обработки прямолинейных профилей зубьев приведены в табл. 3.

Таблица 3 -Параметры торцевых фрез

| Размеры фрезы | | Модуль, мм | Число нарезаемых зубьев Z_k |
|---------------|--------|------------|-------------------------------|
| Диаметр | Ширина | | |
| 370 | 43 | 26-36 | 190-229 |
| 420 | 43 | 36-42 | 137-248 |
| 450 | 43 | 42-55 | 130-260 |
| 520 | 43 | 55 и выше | 130-253 |

Шестерни с сопряженным профилем зубьев могут быть нарезаны специальными торцевыми фрезами. Форма фасонных режущих кромок таких фрез определяется при профилировании и зависит от формы профиля детали и геометрических параметров режущей части фрез. Зубья шестерен с сопряженным профилем можно также фрезеровать методом единичного деления пальцевыми и дисковыми фрезами (рис. 7) соответствующего профиля. Они могут быть нарезаны и методом обкатки специальными червячными фрезами. С целью промышленного внедрения новой технологии зубообработки методом трепанации зубьев по техническому заданию НПО «НИИПТМАШ» (г. Краматорск) были разработаны ЗАО «КЗТС» (г. Коломна) технические проекты специальных двухшпиндельных скоростных суппортов к тяжелым зубофрезерным станкам мод. 5В345П, 5В348П, 5В348/П, 5В348/12,5(рис.1)/

По заказу ЗАО «НКМЗ» и при участии НПО «НИИПТМАШ», ЗАО «КЗТС» (г. Коломна) разработал технический проект и изготовил уникальный двухшпиндельный вертикально-зубофрезерный станок мод. КУ-279 с диаметром рабочего стола $\varnothing 8000$ мм. Практика зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов в условиях ЗАО «НКМЗ» с использованием станка мод. КУ-279 показала возможность повышения производительности зубонарезания в 2-3 раза.

На основе теоретических исследований и практики зубообработки разработан отраслевой стандарт

на допуск зубчатых передач с цилиндрическими колесами диаметром свыше 5 м [2].

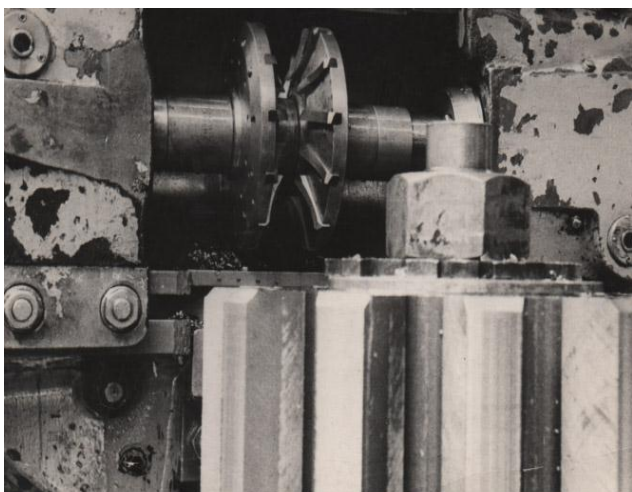


Рис. 7 – Нарезание шестерни $m=36$ мм $Z=18$ с сопряженным профилем зубьев двумя спаренными дисковыми фрезами

Выводы

Разработаны конструкторско-технологические способы с целью повышения производительности и качества зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов на основании анализа геометрии зацепления и профиля зубьев с учетом установления зависимости величины отклонения эвольвентной кривой профиля зуба. Отклонение от касательной к эвольвентной кривой профиля зуба, проведенной в точке, расположенной на делительной окружности при модуле свыше 25 мм и числа зубьев $Z_k \geq 130$ укладываются в допуски на изготовление колес с эвольвентным зацеплением по 9-й степени точности.

Анализ геометрии зацепления и профиля зубьев крупногабаритных зубчатых венцов показал, что величины отклонения эвольвентной кривой профиля зуба от касательной к нему прямой, проведенной в точке, расположенной на делительной окружности при модуле свыше 25 мм и числа зубьев $Z_k=130$ и более, укладываются в допуски на изготовление колес с эвольвентным зацеплением по 9-й степени точности. В рассматриваемых случаях эвольвентный профиль зуба может быть заменен на прямолинейный, что позволяет значительно повысить эффективность технологического процесса зубофрезерования. Аналитиче-

ски обосновано, что с прямолинейным профилем зубьев на колесе при $m=25$ мм и выше и числе зубьев $Z_k = 130 \dots 200$ необходимо вводить в зацепление шестерни, имеющие сопряженный профиль зубьев, а при $Z_k \geq 200$ сопрягаемые шестерни можно изготавливать с обычным эвольвентным профилем зубьев

Применение прямолинейного профиля зубьев на колесе позволяют использовать принципиально новую технологию зубонарезания - способ зубонарезания методом трепанации, при котором черновое фрезерование зубьев производится дисковыми прорезными фрезами, а чистовая обработка по профилю зубьев высокоскоростными торцевыми фрезами, обеспечивающими получение шероховатости рабочей поверхности зубьев в пределах $\sqrt{7} - \sqrt{8}$. Модернизация зубонорезных станков с применением новой технологии зубонарезания позволяет повысить производительность зубообработки до 200%, при этом затраты на модернизацию станка окупятся за 2-3 года при нормальной 3-сменной его нагрузке.

Список литературы: 1. Крупномодульные закаленные колеса. Новые технологические направления зубообработки. Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов / Е. В. Мироненко, В. Ф. Шаповалов, А. А. Клочко [и др.] // Международный информационно-технический журнал. – Харьков, 2009. – No 4. – С. 18–19. 2. Специальные технологи зубообработки крупномодульных закаленных колес : монография / Ю. В. Тимофеев, В. Ф. Шаповалов, А. А. Клочко [и др.]. – Краматорск : ДГМА, 2011. – 128 с. ISBN 978-966-379-524-9. 3. Технология обработки крупномодульных зубчатых колес однокорпусными фрезами двустороннего резания с чередующимися коническими зубчатыми рейками / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – No 49. – С. 111–116.

Bibliography (transliterated): 1. Mironenko E. V., Shapovalov V. F., Klochko A. A. [and others]. *Coarse-grained tempered wheels. New technology trends gears. Metalworking. Equipment and tools for professionals. International information technology magazine.* - Kharkov, 2009. - No. 4. - pp 18-19. Print. 2. Timofeev Y. V., Shapovalov V. F., Klochko A. A. [and others]. *Special technologists gears hardened coarse-grained wheels : monograph.* - Kramatorsk : DSMA, 2011. – 128p. ISBN 978-966-379-524-9. Print. 3. Timofeev Y. V., Mironenko E. V., Klochko A. A., Shapovalov V. F. *Processing technology-pitch gears single-hull double-sided cutters cutting with alternating conical toothed racks.* Bulletin of National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"] Sciences. D. special issue: engineering Technologies. - Kharkov : NTU KhPI, 2010. - No. 49. pp 111-116. Print.

Поступила (received) 03.03.2015

Мироненко Евгений Васильевич – док. техн. наук, проф. ДГМА, Краматорск, тел.: (0626) 41-68-58;

Шаповалов Виктор Федорович – канд. техн. наук, с.н.с. ОАО «НИИПТМаш», Краматорск, тел.: +380 62647-09-00;

Клочко Александр Александрович – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25.

Палашек Станислав Юрьевич – аспирант, ДГМА, Краматорск, тел.: (099)-056-60-36, e-mail: Bistara@gmail.com;

Остапович Евгений Васильевич – магистр Ивано-Франковского НТУ нефти и газа, тел.: +380 (3422) 4-21-39.