

Воронов А. Э.

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

*В статье рассматриваются существующие методы чистовой обработки зубьев цилиндрических зубчатых колес: зубошевингование, холодная обкатка, зубохонингование, непрерывное обкатное зубошлифование, прерывистое профильное зубошлифование, зубофрезерование твердосплавными червячными фрезами. Методы чистовой обработки зубьев цилиндрических зубчатых колес сравниваются по ряду критериев: существующие недостатки, применяемость, точность и производительность. В исследовании выявлено, что метод непрерывного обкатного зубошлифования обладает лучшими показателями производительности и хорошей точностью, но при его использовании возникает искажение профиля зуба обрабатываемого зубчатого колеса.*

**Ключевые слова:** финишная обработка, зубчатое колесо, зубошевингование, зубохонингование, зубофрезерование, зубошлифование, холодная обкатка.

**Актуальность.** В процессе изготовления зубчатых колес методом обката или копирования профиль получаемого зуба имеет не достаточную точность и шероховатость поверхности для непосредственной установки изделия в механизм. К тому же для повышения долговечности изготавливаемого зубчатого колеса его необходимо подвергнуть химико-термической обработке, которая еще сильнее искажает исходный профиль. Для достижения требуемой точности, шероховатости и износостойкости в паре с химико-термической операцией применяют финишную обработку поверхности зубьев. Совершенствование качества финишной обработки поверхности зубьев может быть использовано в различных отраслях машиностроения и приборостроения.

**Постановка проблемы.** Качественная финишная обработка требует совершенствования ее методов, повышения эффективности используемого инструмента и увеличения точности обработки.

**Анализ публикаций.** Вопросами технологических процессов зубообработки и, в частности решением проблемных вопросов повышения качества и производительности обработки, занимались Гохман Х.И. Витренко В. А., Грибанов В.М., Новиков Ф.В., Литвин Ф.Л., Родин П.Р. и др. Однако вопрос о рациональности применения того или иного метода чистовой обработки зубьев цилиндрических зубчатых колес, из существующих на данный момент, до сих пор не имеет единого решения.

**Цель статьи.** Спрос на качественную финишную обработку требует совершенствования ее методов, повышения эффективности используемого инструмента и увеличения точности обработки. Целью данной статьи является анализ существующих методов чистовой обработки зубьев цилиндрических зубчатых колес, выявление "слабых" и "сильных" сторон каждого из них, выявление параметров и показателей требующих улучшения их знаний в целях повышения производительности.

**Изложение основного материала.** В промышленности для чистовой обработки зубьев цилиндрических зубчатых колес наиболее часто применяют следующие методы [1, 2]:

- зубошевингование;
- холодная обкатка;
- зубохонингование;
- непрерывное обкатное зубошлифование;
- прерывистое профильное зубошлифование;
- зубофрезерование твердосплавными червячными фрезами.

При всем разнообразии методов чистовой обработки зубьев наиболее распространенной операцией обработки зубьев закаленных зубчатых колес является зубошлифование.

До 1990-х годов на протяжении многих десятилетий для чистовой обработки зубьев зубчатых колес широко применялся метод шевингования. В качестве инструментов для шевингования применялись: дисковый шевер (рис. 1), шевер-рейка и червячный шевер. Профиль зуба шевера имеет ряд мелких каналов. Каждый выступ канала образует режущую кромку, которая при работе шевера срезает очень тонкую стружку.



Рис. 1. Дисковый шевер  
а – дисковый шевер; б – зуб шевера

Метод шевингования имеет высокую точность обработки достигающую до 5-ой степени и низкую шероховатость обработанного зуба  $R_a=1,25...0,63$  мкм. Такая точность определяется тем, что обработка производится при свободной кинематической связи винтовой передачи – зубчатого колеса и дискового шевра, установленных на перекрещивающихся осях и вращающихся в беззазорном зацеплении.

Вместо зубшевингования часто применяют холодную обкатку зубьев. При обкатке обработка боковых поверхностей зубьев зубчатого колеса осуществляется без снятия стружки посредством пластического деформирования металла в холодном состоянии [3]. В процессе обкатки между обрабатываемым колесом и обкатником имеет место точечный характер касания, что является причиной интенсивного износа обкатника. В результате износа обкатника происходит потеря точности изделия. Исследования проводимые в этой области показали возможность применения новых схем формообразования накатников, которые дают значительно лучшие результаты по сравнению с применяемыми в производстве.

Широкое распространение методы утратили в следствии своего основного недостатка – обработку возможно производить только по незакаленным зубьям. Последующее применение химико-термической обработки (ХТО) снижает полученную точность на 1–2 степени. Методы были вытеснены из производства из-за невозможности производить чистовую обработку после ХТО.

В настоящее время для чистовой обработки зубьев закаленных цилиндрических зубчатых колес применяют зубохонингование и зубошлифование. У зубохонингования скорость обработки в 5–10 раз ниже чем при обработке зубошлифованием. В результате такой обработки наблюдается повышенное механическое напряжение при обработке зубохонингованием и повышенное термического напряжения при обработке зубошлифованием. Из-за низкой скорости обработки и производительности метод зубохонингования не получил широкого распространения.

Отдельное место в чистовой обработке зубьев зубчатых колес получил метод зубофрезерования твердосплавными червячными фрезами (рис. 2).



Рис. 2. Твердосплавная червячная фреза

Твердосплавная червячная фреза представляет собой червяк чаще однозаходный, который имеет определенный исходный контур зубчатой рейки, а расположенные вдоль оси продольные стружечные канавки образуют зубья с режущими кромками, необходимые для обработки резанием.

К недостаткам твердосплавных червячных фрез относят выкрашивание режущих кромок, необходимость применения дорогостоящих специальных зубофрезерных станков с высокой жесткостью и мощным приводом. Как следствие, этот метод чистовой обработки применяют для получения зубчатых колес из неметаллических материалов и цветных металлов.

Зубошлифование является самым распространенным на данный момент методом чистовой обработки. Для шлифования поверхности зубьев зубчатого колеса используют абразивные или металлические круги с одно- или многослойным покрытием нитрида бора. Методами шлифования поверхности зубьев являются: непрерывное обкатное шлифование червячным шлифовальным кругом (рис. 3) и прерывистое профильное шлифование двухсторонним коническим кругом.

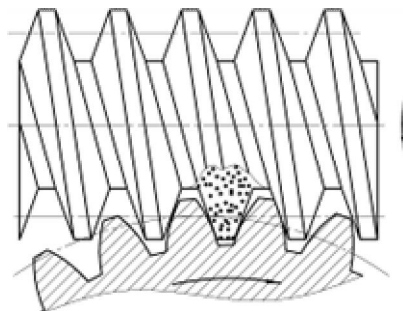


Рис. 3. Непрерывное обкатное шлифование червячным шлифовальным кругом

При непрерывном зубошлифовании в момент входа или выхода зубьев из зацепления могут образовываться погрешности профиля зуба по причине того, что число зубьев, находящихся в зацеплении с левой и правой боковой стороны, разное. Такая погрешность может расти с увеличением угла подъема витка червячного шлифовального круга, что препятствует применению многозаходных инструментов. Однако непрерывное шлифование в отличие от прерывистого профильного практически исключает погрешности шага и обеспечивает наибольшую производительность обработки [4, 5].

При зубошлифовании ответственных зубчатых колес особо важно не допустить появления шлифовочных прижогов и трещин на обрабатываемой поверхности. Для предотвращения подобных дефектов рекомендуется выполнять предшествующие шлифованию зубьев технологические операции механической и термической обработки с необходимой точностью.

В данный момент ведутся разработки инструментов полученных различными способами формообразования [3, 6, 7], способных повысить продуктивность финишной обработки зубчатых колес или предотвратить появления дефектов. Так, например, устранение погрешности профиля зуба при непрерывном обкатном зубошлифовании позволит использовать многозаходные червячные шлифовальные круги, что снизит температуру в зоне контакта инструмента с заготовкой.

**Результаты исследований.** Сравнение методов чистовой обработки позволило выделить наиболее продуктивный метод, широко применяемый в наши дни, – метод непрерывного зубошлифования. Устранение недостатков метода непрерывного зубошлифования позволит получить большую точность обработки с сохранением или повышением производительности.

**Выводы.** Существует большое количество методов чистовой обработки зубьев цилиндрических зубчатых колес. Некоторые из них были навсегда вытеснены из производства более новыми и совершенными. Несмотря на достижения в развитии методов и инструментов финишной обработки зубьев зубчатых колес, результаты обработки все же имеют свои недостатки при применении любого из них. Такими недостатками чаще всего становятся: погрешность профиля получаемого после обработки зуба зубчатого колеса, быстрый износ обрабатывающего инструмента, высокая стоимость инструмента, невысокая скорость обработки. Проведенное исследование методов позволило выделить метод непрерывного зубошлифования как наиболее практичный для финишной обработки зубьев цилиндрических зубчатых колес в силу высокой производительности и точности обработки. Существенным недостатком этого метода является ухудшение точности обработки при увеличении угла подъема линии витка червячного шлифовального круга. Таким образом становится важным вопрос уменьшения погрешности профиля зуба цилиндрического зубчатого колеса при непрерывном обкатном шлифовании червячным шлифовальным кругом.

## Литература

1. Производство зубчатых колес: Справочник / [Калашников С. Н., Калашников А. С., Коган Г. И. и др.] ; под ред. Б. А. Тайца. – [3-е изд.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
2. Калашников А. С. Современные методы чистовой обработки зубьев цилиндрических колес / А. С. Калашников // Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов. Международный информационно-технический журнал. – Харьков, 2007. – № 5. – С. 38-42.
3. Кириченко И. А. Обкатка зубьев цилиндрических колес обкатниками, полученными в пространственном станочном зацеплении / И.А. Кириченко, В.А. Витренко, М.А. Должков // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – Вып. 15. – С. 30-33.
4. Зубчатые передачи: Справочник / [Гинзбург Е. Г., Голованов Н. Ф., Фирун Н. Б., Халебский Н. Т.] ; под ред. Е. Г. Гинзбурга. – [2-е изд. перераб. и доп.] – Л.: Машиностроение, 1980. – 416 с.
5. Данилевский В. В. Технология машиностроения: Учебник для техникумов / В. В. Данилевский. – [5-е изд. перераб. и доп.]. – М., Высш. шк., 1984. — 416 с.
6. Витренко В. А. Исследование процесса изготовления и использования гиперболоидной многозаходной фрезы / В. А. Витренко, В. В. Белозёрова // Научные работы донецкого национального технического университета. Серия: Машиностроение и машиноведение. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – № 110. – С. 49 – 52.
7. Грибанов В. М. Теория гиперболоидных зубчатых передач. Монография / В. М. Грибанов – Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2003. – 272 с.

## References

1. Proizvodstvo zubchatykh koles: Spravochnik / [Kalashnikov S. N., Kalashnikov A. S., Kogan G. I. i dr.] ; pod red. B. A. Taitca. – [3-e izd.]. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 464 st.
2. Kalashnikov A. S. Sovremennye metody` chistovoi obrabotki zubev tcilindricheskikh koles / A. S. Kalashnikov // Metalloobrabotka. Oborudovanie i instrument dlia professionalov. Mezhdunarodnyi informatcionno-tekhniceskii zhurnal. – Narkov, 2007. – № 5. – S. 38-42.
3. Kirichenko I. A. Obkatka zubev tcilindricheskikh koles obkatneykami, poluchennymi v prostranstvennom stanochnom zateplenii / I.A. Kirichenko, V.A. Vitrenko, M.A. Dolzhkov // Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniia. Mezhdunarodnyi sb. nauchnykh trudov. – Donetck: DonGTU, 2000. – Vyp. 15. – S. 30-33.
4. Zubchatye peredachi: Spravochnik / [Ginzburg E. G., Golovanov N. F., Firun N. B., Halebskii N. T.] ; pod red. E. G. Ginzburga. – [2-e izd. pererab. i dop.] – L.: Mashinostroenie, 1980. – 416 st.
5. Danilevskii V. V. Tekhnologiiia mashinostroeniia: Uchebnik dlia tekhnikumov / V. V. Danilevskii`. – [5-e izd. pererab. i dop.]. – M., Vyssh. shk., 1984. — 416 st.

6. Vitrenko V. A. Issledovanie protcessa izgotovleniia i ispolzovaniia giperboloidnoi mnogozahodnoi frezy / V. A. Vitrenko, V. V. Belozyorova // Nauchnye raboty donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie i mashinovedenie. – Donetsk: DonNTU, 2006. – № 110. – S. 49 – 52.
7. Gribanov V. M. Teoriia giperboloidnykh zubchatykh peredach. Monografiia / V. M. Gribanov – Lugansk: izd-vo VNU im. V. Dalia, 2003. – 272 st.

*У статті розглядаються існуючі методи чистової обробки зубів циліндричних зубчастих коліс: зубошевінгування, холодна обкатка, зубохонінгування, безперервне обкатне зубошліфування, переривчасте профільне зубошліфування, зубофрезерування твердосплавними черв'ячними фрезами. Методи чистової обробки зубів циліндричних зубчастих коліс порівнюються за низкою критеріїв: існуючі недоліки, вживаність, точність і продуктивність. У дослідженні виявлено, що метод безперервного обкатного зубошліфування володіє кращими показниками продуктивності і хорошою точністю, але при його використанні виникає спотворення профілю зуба зубчастого колеса.*

**Ключові слова:** *фінішна обробка, зубчасте колесо, зубошевінгування, зубохонінгування, зубофрезерування, зубошліфування, холодна обкатка.*

*The article deals with existing methods of gears finishing of cylindrical gears: teeth shaving, cold running-in, teeth honing, continuous flow forming teeth grinding, discontinuous profile teeth grinding, teeth cutting by hardmetal hob. Methods of gears finishing of cylindrical gears are compared by several criteria: existing weaknesses, applicability, accurateness and productiveness. The research is identified that method of discontinuous profile teeth grinding has best indicators of productivity and good accuracy, but its applying leads to gears profile distortion.*

**Keywords:** *finishing, gears, teeth shaving, teeth honing, teeth cutting, teeth grinding, cold running-in.*

**Воронов А. Э.** – аспірант кафедри технології машиностроєння і інженерного консалтинга ВНУ ім. В. Даля, cooler@ua.ru

Рецензент: Кириченко І. А., доктор технічних наук, професор ВНУ ім. В. Даля

Voronov A.E.

### Increase of gearwheels finishing machining productivity

*The article investigates existing methods of cylinder gearwheels teeth finishing machining: teeth shaving, cold knurling, teeth honing, continuous knurling teeth grinding, discontinuous profile teeth grinding, teeth milling with hard- alloyed cutters. Methods of cylinder gears finishing machining are compared by a number of criteria: existing drawbacks, applicability, precision, and productivity. The investigation has revealed that methods of continuous knurling teeth grinding shows better productivity indices precision however distortion of treated gearwheel teeth profile is brought about when it is used.*

**Keywords:** finishing, gear, teeth shaving, teeth honing, teeth grinding, cold knurling.

**Actuality.** When produced by method of knurling or copying, profile of obtained teeth has insufficient precision and surface roughness preventing the item to be immediately installed into a mechanism. Besides, to increase the durability of the gearwheel being produced it should undergone chemical and thermal treatment which distorts the original profile even more. To achieve required precision, roughness, and durability, finishing machining of teeth surface is used alongside with chemical and thermal operation. Perfection of teeth surface finishing machining may be used in different branches of machine-building and instrument-making.

**Problem statement.** Qualitative finishing machining requires perfection of its methods, increase of effectiveness of instrument used, and rise of machining precision.

**Analysis of publications.** Gokhman Kh. I., Vitrenko V.A., Griбанov V.M., Novikov F.V., Litvin F.L., Rodin P.R., and others investigated the problems of technological processes of teeth machining and handled the problems of quality increase and machining productivity in particular. However, the problem of rationality of a particular existing method of cylindrical gearwheels finishing machining application has no any single decision yet.

**Aim of the article.** A demand for qualitative finishing machining requires a perfection of its methods; increase of the used instruments effectiveness and machining precision. The aim of the given article is to analyse existing methods of cylindrical gearwheels finishing machining, detect their “weak” and “strong” sides, determine parameters and indices which are to be perfected in order to increase the productivity.

**Presentation of the essential material.** The methods frequently used in cylindrical gearwheels finishing machining in industry are as follows [1, 2]:

- teeth shaving;
- cold knurling;
- teeth honing;
- continuous knurling teeth grinding;
- teeth milling with hard-alloyed hobs.

Among all the diversity of teeth finishing machining, teeth grinding is the most commonly used operation in teeth machining of hardened gearwheels.

Till 1990s shaving has been widely used for finishing gearwheel machining for many decades. Disc shaver (Fig.1), shaver-rake, and hob shaver were used as instruments for shaving. Profile of shaver tooth has a great number of shallow canals. Each canal bulge forms a cutting edge which cuts off a very fine chips in shaver operation.

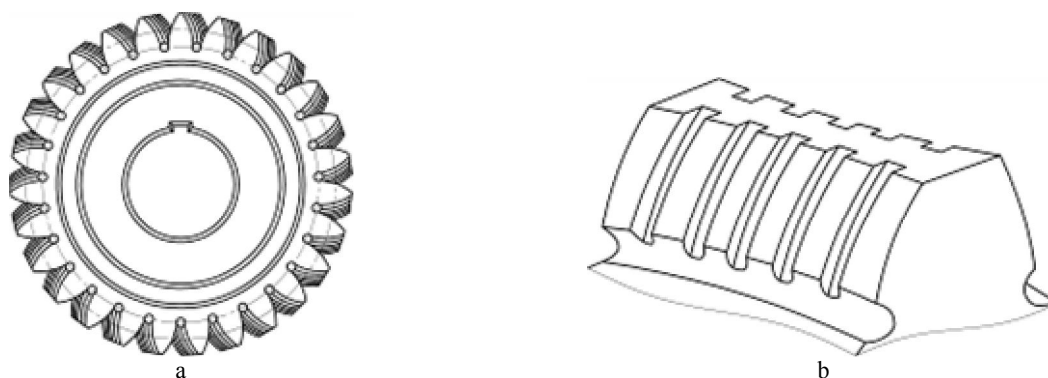


Fig.1. Disc shaver  
a – disc shaver; b – shaver tooth

Shaving has a high precision of machining which reaches the 5<sup>th</sup> degree and a low roughness of treated tooth  $R_a = 1,25 \dots 0,63$  mcm. Such precision is explained by the fact that the machining is performed under free kinematic link of screw gear – a gear and a disc shaver placed on the crossed axis and rotating in the gapless engagement.

Teeth cold knurling is often used instead of teeth shaving. In the process of knurling, machining of gearwheel side surfaces is performed by means of plastic deformation of metal in a cold state without cutting off chips [3]. In knurling process a point-like contact has place between a treated gearwheel and a knurl, which is the reason of

intensive knurl wear. As the result of knurl wear the loss of item precision takes place. Research undertaken in this sphere revealed the possibility of using new schemes of knurls formation giving much better results compared to those applied in industrial production.

Common methods have lost their popularity due to their major drawback – they may be used only when machining unhardened teeth. The subsequent use of chemical and thermal treatment (ChThT) decreases the obtained precision by 1-2 degrees. These methods were ousted out of production because it is impossible to produce finishing machining after ChThT.

At present teeth honing and teeth grinding are used for hardened cylindrical gearwheels finishing machining. Teeth honing machining speed is 5 to 10 times lower than that of teeth grinding. Such machining results in increased mechanical stress when teeth honing is used and increased thermal stress when teeth grinding is used. The method of teeth honing has not become widely spread because of its low machining speed and low productivity.

The method of teeth milling with hard-alloyed hobs has got a specific place in gearwheels finishing machining (Fig. 2).



Fig. 2. Hard-alloyed hob

Hard-alloyed hob is more frequently a single-thread hob having a definite original contour of a gear rack. Longitudinal chips flutes placed along the axis form teeth having cutting edge necessary for cutting operations.

Cutting edges chipping, necessity to apply expensive special gear-cutting machine-tools of high stiffness equipped with powerful drive are considered drawbacks of hard-alloyed hobs. As a result this method of finishing machining is used to obtain gearwheels made of non-metal materials and nonferrous metals.

At present teeth grinding is the most widely spread method of finishing machining. One- or multilayer boron nitride coated abrasive and metal wheels are used to grind the surface of a gearwheel teeth. Methods of teeth surface grinding are: continuous knurling grinding with hob grinding wheel (Fig. 3) and discontinuous profile grinding with cone grinding wheel.

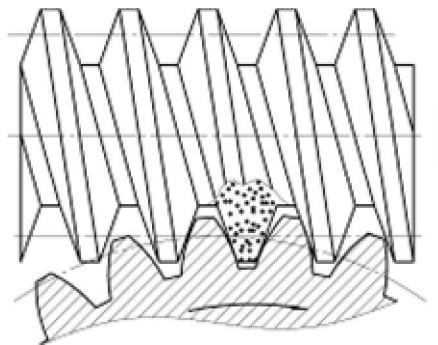


Fig. 3. Continuous knurling grinding with hob grinding wheel

When using continuous teeth grinding, tooth profile error may arise at the moment of teeth input or output out of the engagement due to the fact that a number of teeth involved in engagement on the left or right side differs. Such error may grow with the increase of angle of worm grinding wheel spiral turn which prevents the use of multi-pass instruments. However, continuous grinding in contrast to discontinuous profile grinding practically excludes errors of pitch and provides the greatest productivity of machining. [4, 5].

When grinding critical gearwheels the most important problem is to avoid an appearance of grinding burn marks and cracks on the surface being machined. To avoid such defects it is recommended to perform technological operations of mechanical and thermal treatment prior to teeth grinding with all necessary precision.

At present the instruments are being developed which are obtained using different methods of shape formation [3, 6, 7]. These methods may increase productivity of gearwheel finishing machining and prevent the appearance of defects. Thus, for instance, elimination of tooth profile error in continuous knurling teeth grinding will allow to use multi-pass worm grinding wheels which leads to temperature decrease in the zone of instrument and work-piece contact.

**Investigations results.** Comparison of finishing machining methods has allowed to single out the most productive method which is widely used nowadays. This is the continuous teeth grinding method. Elimination of drawbacks of the teeth continuous grinding method will allow to get higher precision of machining while saving or even increasing the productivity.

**Conclusions.** There are a great number of methods of cylindrical gears teeth finishing machining. Some of them have been ousted out of production process by newer and more perfect ones for ever. In spite of achievements in development of methods and instruments of finishing machining of gearwheels teeth the results of the machining have their own drawbacks when used. The following drawbacks are the most frequent ones: error of profile obtained after gearwheel tooth machining; quick wear of machining instrument; high price of the instrument; low speed of machining. Conducted investigation of existing methods has made it possible to single out the method of continuous teeth grinding as one of the most practical method for cylindrical gearwheels finishing machining due to its high productivity and precision of machining. Considerable drawback of this method is deterioration of machining precision at increase of the angle of worm grinding wheel spiral turn. Thus, the problem of error decrease of cylindrical gearwheel teeth profile at continuous knurling grinding with worm grinding wheel becomes very important.

#### References

1. Proizvodstvo zubchatykh koles: Spravochnik / [Kalashnikov S. N., Kalashnikov A. S., Kogan G. I. i dr.] ; pod red. B. A. Taitca. – [3-e izd.]. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 464 st.
2. Kalashnikov A. S. Sovremennye metody` chistovoi obrabotki zubev tcilindricheskikh koles / A. S. Kalashnikov // Metalloobrabotka. Oborudovanie i instrument dlia professionalov. Mezhdunarodnyi informacιονno-tekhnicheskii zhurnal. – Harkov, 2007. – № 5. – S. 38-42.
3. Kirichenko I. A. Obkatka zubev tcilindricheskikh koles obkatneykami, poluchennymi v prostranstvennom stanochnom zatceplenii / I.A. Kirichenko, V.A. Vitrenko, M.A. Dolzhkov // Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniia. Mezhdunarodnyi sb. nauchnykh trudov. – Donetsk: DonGTU, 2000. – Vyp. 15. – S. 30-33.
4. Zubchatye peredachi: Spravochnik / [Ginzburg E. G., Golovanov N. F., Firun N. B., Halebskii N. T.] ; pod red. E. G. Ginzburga. – [2-e izd. pererab. i dop.] – L.: Mashinostroenie, 1980. – 416 st.
5. Danilevskii V. V. Tekhnologiia mashinostroeniia: Uchebnyk dlia tekhnikumov / V. V. Danilevskii`. – [5-e izd. pererab. i dop.]. – M., Vyssh. shk., 1984. — 416 st.
6. Vitrenko V. A. Issledovanie protcessa izgotovleniia i ispolzovaniia giperboloidnoi mnogozahodnoi frezy / V. A. Vitrenko, V. V. Belozyorova // Nauchnye raboty donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta. Seriia: Mashinostroenie i mashinovedenie. – Donetsk: DonNTU, 2006. – № 110. – S. 49 – 52.
7. Griбанov V. M. Teoriia giperboloidnykh zubchatykh peredach. Monografiia / V. M. Griбанov – Lugansk: izd-vo VNU im. V. Dalia, 2003. – 272 st.