

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**АНЦИФЕРОВА ОЛЕСЯ ОЛЕКСАНДРІВНА**

УДК 621.9

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ  
ПОВЕРХОНЬ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ПРИ УДОСКОНАЛЕННІ МЕТОДУ  
ЗУБОШЛІФУВАННЯ**

05.02.08 – технологія машинобудування  
13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття  
наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Анциферова О.О.

Науковий керівник:  
Клочко Олександр Олександрович,  
доктор технічних наук, професор

Харків – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Анциферова О.О.* Технологічне забезпечення точності та якості поверхонь зубчастих коліс при удосконаленні методу зубошліфування.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2018.

*Об'єкт дослідження* – технологічний процес зубошліфування зубчастих коліс переривчастими шліфувальними кругами.

*Предмет дослідження* – вплив технологічних показників процесу переривчастого зубошліфування на експлуатаційні властивості та якість поверхневого шару зубчастих коліс.

У першому розділі «Формування поверхневого шару в технологічному процесі шліфування зубчастих коліс» показав, що аналіз проблеми пов'язаної зі станом поверхневого шару деталей машин, в тому числі і зубчастих коліс, вказує на те, що існує комплекс проблем технологічних, конструкторських і експлуатаційних, в сукупності пред'являють вимоги до властивостей і характеристик поверхневого шару, що вказує на необхідність проведення наукових досліджень. Стан поверхневого шару деталей, глибина якого визначається ступенем зміни властивостей і характеристик, залежить не тільки від вихідного матеріалу, з якого виготовлена деталь (зубчасте колесо), але пов'язано з точністю її розмірів і форми.

Значна кількість зубчастих коліс шліфується після термічної і хіміко-термічної обробки і з цієї точки зору необхідно зберігати поверхневий шар, який отриманий на цих етапах. Після термічної обробки необхідно усунути деформований поверхневий шар, який може мати значну величину і на це слід звертати увагу при шліфуванні зуба.

Істотним є вплив на точність ріжучого інструменту (шліфувального круга), в тому числі на характеристики поверхневого шару зуба зубчастого колеса, ступінь і характер впливу якого до теперішнього часу не досліджено повною мірою. У той же час вплив шліфувального круга в процесі шліфування

залежить не тільки від виду і розмірів зерен матеріалу, його структури, зв'язки і твердості, але також і від його геометричних параметрів.

Величезне значення мають параметри процесу шліфування, відповідний вибір яких дозволяє отримати очікувану і необхідну геометричну точність зубів зубчастих коліс і характеристики їх поверхневого шару. Звідси виникає необхідність цілеспрямованої зміни якості поверхневого шару зубів зубчастих коліс в процесі остаточної обробки шліфуванням. Особливо ця проблема стосується забезпечення високої якості і точності зубів зубчастих коліс, що шліфуються по методу обкатки двостороннім конусним шліфувальним кругом з одночасним досягненням заданих властивостей і характеристик поверхневого шару.

У другому розділі «Розробка фізико-математичної моделі процесу зубошліфування абразивним кругом» показав, що аналіз математичної моделі процесу формоутворення евольвентного шліфуванням профілю зуба конусним кругом впливає велика кількість чинників на похибку профілю зуба колеса пов'язаних з кількістю одночасно виконуваних рухів відповідно до реалізованої на верстаті кінематичній схемі, яка відповідає цьому способу обробки. В силу великого числа узгоджено виконуваних рухів на точність профілю істотно впливає точність виконавчих органів верстата, що визначає підвищені вимоги до статичної точності і жорсткості обладнання та його динамічної стійкості.

Шліфування колами з  $\alpha_{ин} \neq 0$  виявляється кращим, так як виключає наявність кінематичної похибки профілю у ніжки зуба колеса і вплив радіального биття на точність профілювання. У зв'язку з тим що зі збільшенням діаметра шліфувального круга знижуються середні (інтегральні) сили різання, доцільно використовувати кола найбільшого діаметра, за умови відсутності додаткових складнощів, пов'язаних з усуненням їх дисбалансу, в зв'язку з ростом маси інструменту.

Аналіз теплофізичних математичних моделей шліфування на основі теплофізичних процесів, що протікають в зоні контакту показує, що вибір максимально допустимої швидкості шліфування за величиною температури в зоні різання є кращим, тому що:

а) із зростанням миттєвої температури в зоні контакту видаляється матеріалу з зерном абразивного інструменту падає температура зв'язки, що зменшує механічне зношування інструменту:

б) з ростом швидкості шліфування зменшується величина середнього зусилля різання, тому при вирішенні задач динамічного балансування кіл можна очікувати підвищення точності і якості обробки, так як загальна температура обробленої поверхні буде зменшуватися.

Зміна контактної температури за період обкатки має більше складний характер. Збільшення радіусу кривизни евольвенти зуба призводить до зменшення контактних температур в зоні ділильної окружності і підвищенні її на голівці зуба, пов'язано це з переважаючим впливом потужності теплового джерела.

У третьому розділі «Теплонапруженість процесу та динаміка преривчастого зубошліфування за рахунок формоутворення круга» розроблені шліфувальні круги, які мають канавки, що забезпечують зменшення нагрівання поверхні зубчастого колеса за рахунок періодичної зміни процесу зйому метала, що забезпечує значне зменшення засолювання шліфувального круга, а саме перехіда шліфування в різання.

Розроблено математичну модель коливання глибини переривчастого зовнішнього шліфування, яка реалізована в пакеті «VisSim». Розроблена модель і блок-схема її реалізації може бути використана для аналізу широкого спектра умов переривчастого шліфування.

Встановлено, що моделювання «жорсткості» процесу переривчастого шліфування, як функції часу у вигляді гармонійного або ступеневої сигналів не вносить велику різницю в величину коливань глибини шліфування.

Колівання глибини шліфування порушену переривчастою поверхнею кола, при рекомендованих співвідношеннях розмірів виступів і западин на ній, знаходяться в діапазоні шорсткості чистового або тонкого шліфування. Отже, вимоги до шорсткості поверхні і її хвилястість не обмежують застосування переривчастого шліфування.

Результати експериментальних досліджень показали, що поряд з режимами і геометрією інструменту значний вплив на шорсткість поверхні надає жорсткість обладнання на якому обробляється деталь.

У четвертому розділі «Експериментальні дослідження процесу переривчастого зубошліфування зубчастих коліс» на підставі отриманих результатів виконаних досліджень по зміні стану поверхневого шару зубчастих коліс в технологічних процесах їх остаточної обробки, а також щодо впливу конструктивних особливостей зубчастих коліс на якість поверхні можна зробити наступні висновки: стан поверхневого шару зубів зубчастих коліс, що визначає якість поверхні цих деталей машин характеризується, перш за все, шорсткістю поверхні, мікроструктурою, мікротвердістю, залишковими напруженнями, а також іншими властивостями і характеристиками, які властиві багатьом деталям машин, які змінюються в залежності від хімічного складу оброблюваного матеріалу. Проте за рівнем впливу стану поверхневого шару на експлуатаційні характеристики в зубчастих колесах є свої особливості, які полягають в більш складному напруженому стані поверхневого шару зубів в процесі їх експлуатації (циклічні ударні навантаження в присутності тертя і зносу, іноді супроводжується явищем Фретинг. Зазначене вимагає особливого підходу до вибору методів і умов здійснення остаточної обробки поверхонь зубів, які б дозволили цілеспрямовано змінювати стан поверхневого шару - якість поверхні, що забезпечує високу його опір вищевказаним експлуатаційним навантаженням.

Встановлені вище взаємозв'язку і отримані залежності на підставі проведених численних експериментальних досліджень, а також аналіз конструктивних особливостей зубчастих коліс дозволяють управляти станом поверхневого шару зубчастих коліс в залежності від їх умов експлуатації і які при цьому виникають експлуатаційні навантаження.

У п'ятому розділі «Реалізація можливостей удосконалення технології переривчастого зубошліфування в промислових умовах» показали, що зубчасті колеса працюють в умовах високого контактного впливу, сприймають великі навантаження. Поверхневий шар зубів зубчастих коліс характеризується

макрівідхиленням, хвилястістю, шорсткістю, субшероватістю, адсорбірованою зоною, зоною оксидів, граничної зоною матеріалу, зони матеріалу зі зміненими фізико-хімічними властивостями. Тому забезпечення якості поверхневого шару є досить складною технологічною задачею, розв'язуваної при обробці зубчастих коліс переривчастим зубошліфуванням.

Безперечним фактом є те, що стан поверхневого шару залежить від технології і обраного матеріалу, які впливають на експлуатаційну якість. Її забезпечення є основною умовою виготовлення виробу, в той час, коли споживач очікує ще й обслуговування - гарантоване і після гарантії.

Аналітичні моделі формування якості поверхневого шару циліндричних загартованих зубчастих коліс необхідно розробляти з урахуванням фактичних значень механічних характеристик матеріалу деталі і умов обробки.

*Ключові слова:* технологічне забезпечення якості, зубошліфування, зубчасте колесо, технологічне забезпечення точності, теплонапруженість, поверхневий шар, шорсткість, переривчасте шліфування, круг з кишнями.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Анцыферова О.А. Оценка влияния инвестиций на объемы экспорта. Н.Н. Внукова, О.А. Анцыферова, В.А. Ковальчук // Економічний часопис ХХІ. – 2014. – № 7-8 (2). – С. 48-51.

2. Анцыферова О.А. Технологические процессы формирования поверхностного слоя зубчатых колес тяжелых токарных станков с ЧПУ / А.А. Клочко, Е.В. Мироненко, О.А. Анцыферова., Л.А. Макастрова., В.Е.Киреев // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. – Краматорск: ДГМА. – 2015. – Вып. 37. – С. 105–112.

3. Анцыферова О.А. Исследование структурных превращений и их влияние на поверхностный слой при зубошлифовании / М. С. Степанов, А. А. Клочко, О.А. Анцыферова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП». – 2015. – №40 (1149). – С. 113-116.

4. Анциферова О.О. Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса

зубофрезерования / О.М. Шелковий, О.О. Клочко, М.І. Гасанов, Д.О. Кравченко, О.О. Анциферова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2017. – № 26 (1248). – С. 66–74.

5. Анциферова О.О. Математична модель теплонапруженості процесу імпульсного переривчастого шліфування / Ф.В. Новіков, О.О. Клочко, О.А. Охріменко, О.О. Анциферова, Є.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2018. – № 6 (1282). – С. 127-132.

6. Анцыферова О.А. Повышение качества поверхностного слоя зубьев изношенных и восстанавливаемых крупногабаритных зубчатых колес поверхностным пластическим деформированием / В.Ф. Шаповалов, В.И. Печеный, А.А. Клочко, А.А. Пермяков, М.И. Гасанов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – Вип. 41. – С. 56–67.

7. Анцыферова О.А. Технология ремонта и восстановления крупномодульных закаленных зубчатых колес методом высокоскоростной лезвийной обработки /А.А.Клочко, А.Н. Шелковой, В.Ф. Шаповалов, О.А. Анцыферова, А.В. Беловол // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – Харків. – 2018. – № 2 (2). – С. 38–47.

8. Antsyferova O. Optimizing the technology of reconditioning large high precision gear rims / Shapovalov V., Klochko A., Gasanov M., Antsyferova O., Belovol A. // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – Харків. –2018. – № 1 (3). – С. 59–70.

9. Анцыферова О.А. Технологические условия формирования параметров поверхностного слоя зубчатых колес и их влияние на эксплуатационные свойства / А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, О.А. Анцыферова, С.Ю. Палашек // Физические и компьютерные технологии. Труды 21-й Международной научно-практической конференции. г. Харьков. – Д.: Лира – 2015. – С. 107–120.

10. Анциферова О.О. Технологічні методи формоутворення поверхневого шару загартованих зубчастих коліс / О. О. Клочко, Є. В. Міроненко, О. О. Анциферова, О. М. Лішенко // Збірник наукових праць. Прогресивні

технології в машинобудуванні: Тези докладів V-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів – 2016. – С. 51–52.

11. Анцыферова О.А. Интенсификация и влияние структурных превращений при зубошлифовании / М.С. Степанов, Ф.В. Новиков, А.А. Клочко, О.О. Анцыферова, С.Ю. Палашек // Физические и компьютерные технологии. Труды 22-й Международной научно-практической конференции. г.Харьков. – Д.: Лира. – 2016. – С. 107–109.

12. Анцыферова О.А. Усовершенствованная система управления качеством разработки программного обеспечения / Змиевская В.Н., Анцыферова О.А// IV Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації», яка відбулась у Черкаському державному технологічному університеті – Черкаси: ЧТДТУ. – 2016. – С. 39.

13. Анцыферова О.А. Предпосылки исследования новых направлений комбинированного формообразования поверхностного слоя зубчатых колес / А.А. Клочко, С.В. Рябченко, О.А. Анцыферова, Е.В. Перминов // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція « Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», яка відбулась у Національному технічному університеті України « Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» – Київ: НТУУ «КПІ». – 2017. – Т. 4. – С. 346– 347.

14. Анцыферова О.А. Технологические возможности зубообработки высокоточных крупногабаритных зубчатых венцов / А.Н. Шелковой, А.А. Пермяков, А.А. Клочко, О.А. Анцыферова, В.Ф. Шаповалов // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2017) : матеріали тез доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції: у 2-х т. / Чернігівський національний технологічний університет [та ін.]; відп. за вип.: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]. – Чернігів : ЧНТУ– 2017. – Т. 1. – С. 163– 164.

15. Анцыферова О.А. Исследование процесса скоростного зубофрезерования закаленных цилиндрических зубчатых колес абразивным инструментом / А.А. Клочко, О.А. Анцыферова, В.В. Герасим // Всеукраїнська



наукова конференція «Розвиток прикладної науки, освіти та студентського самоврядування на Буковині». – Чернівці. – 2017. – С. 36 – 38.

16. Анциферова О.А. Импульсное зубошлифование закаленных цилиндрических зубчатых колес / А.А. Клочко, Е.В. Басова, О.А. Анциферова, А.Н. Лищенко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали XV Міжнар. наук.-техн. конф./ Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА. – 2017. – С. 39.

17. Анциферова О.А. Новые способы высокоскоростной обработки закаленных цилиндрических зубчатых колес абразивным инструментом / А.А. Клочко, О.А. Анциферова // Проблеми інформатики та моделювання. Тезиси сімнадцятої міжнародної науково-технічної конференції. Одеса. – 2017. – С. 39-40.

18. Анциферова О.А. Новые способы высокоскоростной обработки закаленных цилиндрических зубчатых колес абразивным инструментом / А.А. Клочко, М.И. Гасанов, О.А. Анциферова // Информатика, управління та штучний інтелект. Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2017. – С. 54-55.

19. Анциферова О.О. Моделювання та аналіз імпульсного зубошліфування в пакеті «VisSim»/ Ф.В. Новіков, Ю.А. Сізий, О.О.Клочко, О.О.Анциферова, Г.І. Черкашина // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА. – 2018.– Вып. 37. – С. 66

## ABSTRACT

*Antsyferova O.O.* Improve the efficiency of the process of impulse grinding to ensure the accuracy and quality of the surface layer of teeth. – Manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences in the specialty 05.02.08 - technology of mechanical engineering. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2018.

The object of the study is the technological process of gear grinding wheels with intermittent grinding wheels.

The subject of the research is the influence of technological parameters of the process of interrupted grinding on the performance and quality of the surface layer of gear wheels.

In the first section "Formation of the surface layer in the process of grinding gear wheels" showed that the analysis of the problem associated with the state of the surface layer of machine parts, including gear wheels, indicates that there is a set of problems of technological, design and operational, in aggregate, impose requirements for the properties and characteristics of the surface layer, indicating the need for scientific research. The state of the surface layer of parts, whose depth is determined by the degree of change in properties and characteristics, depends not only on the source material from which the component is made (including the gear), but also due to the accuracy of its size and shape.

A significant amount of gear wheels is polished after thermal and chemical-thermal treatment, and from this point of view it is necessary to store the surface layer obtained at these stages. After the heat treatment it is necessary to remove a deformed surface layer, which can be significant and should pay attention to the grinding of the tooth. Significant influence on the accuracy of the cutting tool (grinding wheel), including the characteristics of the surface layer of the tooth of the toothed wheel, the degree and nature of the impact of which to date has not been fully explored. At the same time, the impact of the grinding wheel during the grinding depends not only on the type and size of the grains of the material, its structure, the bond and hardness, but also on its geometric parameters.

Of great importance are the parameters of the grinding process, the appropriate selection of which allows you to get the expected and necessary geometric accuracy of the teeth of the gear wheels and characteristics of their surface layer. Hence the need for a purposeful change in the quality of the surface layer of the teeth of the toothed wheels in the process of final finishing by grinding. Especially this problem concerns the maintenance of high quality and accuracy of teeth of toothed wheels, which are polished by the method of rolling with double-sided cone grinding wheel, with simultaneous achievement of the given properties and characteristics of a surface layer. In the second section, "Development of the physical-mathematical model of the abrasive circle grinding process", showed that the analysis of the mathematical model of the process of shaping the involute grinding of the profile of the tooth cone circle is influenced by a large number of factors on the error of the profile of the tooth of the wheel associated with the number of simultaneously executed movements in accordance with the realized on The machine is a kinematic scheme that corresponds to this method of processing. Due to the large number of coordinated executable movements, the accuracy of the profile is significantly affected by the accuracy of the executive bodies of the machine, which determines the increased requirements for the static accuracy and rigidity of the equipment and its dynamic stability.

Grinding circles turns out  $\alpha_{uu} \neq 0$  to be better, since it eliminates the presence of a kinematic error profile in the legs of the tooth of the wheel and the effect of radial beating on the accuracy of profiling. Due to the fact that with the increase in the diameter of the grinding wheel the average (integral) cutting forces are reduced, it is advisable to use circles of the largest diameter, in the absence of additional difficulties associated with eliminating their imbalance, in connection with the growth of the mass of the instrument. The analysis of thermophysical mathematical models of grinding on the basis of the thermophysical processes occurring in the contact zone shows that the choice of the maximum permissible grinding speed over the temperature in the cutting zone is preferable because:

a) as the instantaneous temperature increases in the contact area, the material with the grain of the abrasive tool is removed, the connection temperature decreases, which reduces the mechanical wear of the tool;

b) with the growth of the speed of polishing the size of the average cutting force decreases; therefore, in solving problems of dynamic balancing of circles one can expect an increase in the accuracy and quality of processing, as the total temperature of the treated surface will decrease.

The change in contact temperature over the period of rotation is more complex. An increase in the radius of curvature of the tooth evolvent leads to a decrease in the contact temperatures in the zone of the dividing circle and increases it on the tooth head, due to the predominant influence of the power of the heat source. In the third section, "The heat stress of the process and the dynamics of interrupted grinding due to the formation of the circle," grinding wheels have been developed that have grooves that reduce the heating of the surface of the toothed wheel due to the periodic change in the process of sizing the metal, which ensures a significant reduction in the grinding wheel salting, in cutting. The mathematical model of the oscillation of the intermittent circular external grinding is developed and implemented in the package "VisSim". The developed model and block diagram of its realization can be used for the analysis of a wide spectrum of conditions of intermittent grinding. It has been established that the simulation of the "hardness" of the process of discontinuous grinding as a function of time in the form of harmonic or stepping signals does not make a big difference in the magnitude of the fluctuations of the depth of grinding. The oscillation of the grinding depth disturbed by the intermittent surface of the circle, with the recommended ratios of the sizes of the protrusions and depressions on it, are in the range of roughness of the finishing or thin grinding. Consequently, the requirements for surface roughness and its wavelengths do not restrict the use of intermittent grinding.

The results of experimental studies have shown that, along with the modes and geometry of the tool, the rigidity of the equipment on which the part is processed is a significant influence on the roughness of the surface. In the fourth section "Experimental researches of the process of interrupted grinding of gear wheels" on

the basis of the results of the performed researches on the change of the state of the surface layer of gear wheels in the technological processes of their final machining, as well as on the influence of the design features of the gear wheels on the surface quality, the following conclusions can be drawn: The condition of the surface layer of the teeth of the toothed wheels, which determines the quality of the surface of these parts of the machines, is characterized, above all, by surface roughness, microstructure, microhardness, residual stresses and other properties and characteristics that are inherent in many parts of machines and which vary depending on the chemical composition of the machined material. However, the level of influence of the surface layer on the performance characteristics of the gears has its own characteristics, which are in the more complex stress state of the surface layer of teeth during their operation (cyclic shock loads in the presence of friction and wear, sometimes accompanied by the phenomenon of Frings). This requires a special approach before choosing the methods and conditions for the final treatment of the surfaces of the teeth that would allow the purposeful change of the surface layer - the surface quality, which provides its high resistance to the above operating load. The above-mentioned interrelation and the obtained dependences on the basis of numerous experimental researches, as well as the analysis of the design features of gear wheels, allow us to control the state of the surface layer of gear wheels depending on their operating conditions and the operational loads arising therewith.

In the fifth section "Implementation of the possibilities of improving the technology of intermittent grinding in industrial conditions" showed that the gears operate in conditions of high contact action, perceive large loads. The surface layer of the teeth of the gears is characterized by macroscopic deviation, wavelength, roughness, suberrorhivity, adsorbed zone, oxide zone, boundary zone of the material, material zone with changed physical and chemical properties. Therefore, the quality assurance of the surface layer is a rather complicated technological problem solved by the processing of gear wheels by interrupted grinding. The undeniable fact is that the state of the surface layer depends on the technology and the selected material that affects the operational quality. Its security is a prerequisite for the product, while the consumer also expects the service to be guaranteed, even after the warranty.

Analytical models for the formation of the surface layer of cylindrical tempered gears must be developed taking into account the actual values of the mechanical characteristics of the material of the part and the working conditions. Key words: technological quality assurance, grinding, gear wheel, technological precision, heat stress, surface layer, roughness, intermittent grinding, circle with pockets.

## REFERENCES

1. Antsyferova O. Estimating the impact of investments on export volumes / Antsyferova O., Vnukova N., Kovalchuk V // Economic Newsletter – XXI. – 2014. – No. 7-8 (2). – P. 48-51.
2. Antsyferova O. Technological processes of formation of a surface layer of gear wheels of heavy turning machines with CNC / Klochko A., Mironenko E., Antsyferova O., Makatrov L., Kiriev V. // Reliability of the instrument and optimization of technological systems: Sat. scientific tr - Kramatorsk: DGMA, 2015. – Issue 37. – P. 105-112.
3. Antsyferova O. Investigation of structural transformations and their influence on the surface layer during tooth polishing / Stepanov M., Klochko A., Antsyferova O. // Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Technology in Mechanical Engineering. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2015. – №40 (1149). – P. 113-116.
4. Antsyferova O. Functional aspects of simulation mathematical modeling of geometrical parameters of the process of milling / Silk O., Klochko O., Gasanov M., Kravchenko D., Antsyferova O. // Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Technology in Engineering. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2017. – № 26 (1248). – P. 66-74.
5. Antsyferova O. Mathematical model of heat stress of impulse discontinuous grinding process / Novikov F., Klochko O., Okhrimenko O., Antsyferova O., Basova Ye. // Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Technology in Engineering. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2018. – № 6 (1282). – P. 127-132.
6. Improving the quality of the surface layer of teeth of worn and restored large-sized gears by surface plastic deformation / Shapovalov V., Baked V., Klochko A., Permyakov A., Gasanov M., Antsyferova O. // Instrument Reliability and

Technological Systems Optimization: Sb.Sci. Ave. – Kramatorsk: DDMA. – 2018. – Vip. 41. – P. 56-67.

7. Antsyferova O., Klochko A., Silkova A., Shapovalov V., Belovol A., Technology of repair and restoration of large-modular hardened gears by high-speed blade processing. // Current state of scientific researches and technologies in industry. – Kharkiv 2018. – № 2 (2). – P. 38-47.

8. Antsyferova O., Shapovalov V., Klochko A., Gasanov M., Belovol A. Optimizing the technology of reconditioning large high precision gear rims. // Current state of scientific researches and technologies in industry. – Kharkiv, 2018. – № 1 (3). – P. 59-70.

9. Antsyferova O. Technological conditions for the formation of the parameters of the surface layer of gears and their influence on the operational properties / Shelkova A., Klochko A., Antsyferova O., Palashek S. // Physical and Computer Technologies. Proceedings of the 21st International Scientific and Practical Conference. December 24-25, 2015, Kharkov. - D: Lira, 2015. – P. 107-120.

10. Antsyferova O.O. Technological methods of formation of a surface layer of hardened gear wheels / Klochko O., Mironenko E., Antsyferova O., Lyshenko A. // Collection of scientific works. Progressive Technologies in Mechanical Engineering: Abstracts of the V-th All-Ukrainian Scientific and Technical Conference, February 8-12, 2016 - Lviv Polytechnic National University. - Lviv, 2016. – P. 51-52.

11. Antsyferova O. Intensification and influence of structural transformations in tooth polishing / Stepanov M., Novikov F., Klochko A., Antsyferova O, Pashkek S. // Physical and Computer Technologies. Proceedings of the 22nd International Scientific and Practical Conference. December 7-9, 2016, Kharkiv. - D.: Lira, 2016. – P. 107-109.

12. Antsyferova O. Improved Software Quality Management System / Zmiyevskaya V., Antsyferova O. // IV International Scientific and Technical Conference "Problems of Informatization", held on November 3-4, 2016 at the Cherkasy State Technological University - Cherkasy, 2016. – P. 39.

13. Antsyferova O. Prerequisites for research of new directions of combined formation of the surface layer of gear wheels / A. Klochko, S. Ryabchenko,

O. Antsyferova, E. Perminov // XVII International Scientific and Technical Conference «Progressive Technology, Technology and Engineering Education», held on June 29-July 01, 2017 at the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky" - Kyiv: NTUU "KPI", 2017. – V. 4. – P. 346- 347.

14. Antsyferova O. Technological possibilities of tooth processing of high-precision large-sized gears / Silkova A., Permyakov A., Klochko A., Antsyferova O., Shapovalov V. // Integrated quality assurance of technological processes and systems (KJYSPSPS-2017): materials of abstracts of the VII International scientific and practical conference (Chernihiv, April 24-27, 2017): 2 t / Chernihiv National Technological University [etc.]; rep. For example: Eroshenko Andrey Mikhailovich [and others]. - Chernigov: CSTU, 2017. – T. 1. – P. 163-164.

15. Antsyferova O. Investigation of the process of high-speed grinding of hardened cylindrical gears with abrasive tool / Klochko A., Antsyferova O., Gerasim V. // All-Ukrainian Scientific Conference «Development of Applied Science, Education and Student Self-Government in Bukovina» (May 26-27, 2017, Chernivtsi): materials conf. - Chernivtsi, 2017. - P. 36-38.

16. Antsyferova O. Impulse grinding of hardened cylindrical gears / Klochko A., Basov E., Antsyferova O., Lyshenko A. // Heavy engineering. Problems and prospects of development: Materials of the XV International. Sci.-Tech. Conf., May 30 - June 1, 2017 / Under the congregation. Ed. V. D. Kovalev. - Kramatorsk: the DDA, 2017. - P. 39.

17. Antsyferova O. New methods of high-speed treatment of hardened cylindrical gears by abrasive tools / Klochko A., Antsyferova O. // Problems of Informatics and Modeling (PIM 2017) Abstracts of the seventeenth international scientific and technical conference. – Odessa. – 2017. – P. 39-40.

18. Antsyferova O. New methods of high-speed treatment of hardened cylindrical gears by abrasive tools / Klochko A., Gasanov M., Antsyferova O. // Informatics, management and artificial intelligence. Materials of IV International scientific and technical conference of students, masters and post-graduate students. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – P. 54-55.



19. Antsyferova O. Modeling and analysis of impulse grinding in the package «VisSim» / Novikov F., Sizy Yu., Klochko O., Antsyferova O., Cherkashina G. // Reliability of the tool and optimization of technological systems: Sat. scientific tr - Kramatorsk: DGMA, 2018. – Issue. 37. – P. 66.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ І УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ .....	5
ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1 ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ШЛІФУВАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС .....	12
1.1. Аналіз особливостей технологічних процесів зубошліфування коліс .....	12
1.2. Поверхневий шар деталі і його значення для оцінки якості шліфування .....	17
1.3. Властивості поверхневого шару і технологічні чинники, які на них впливають.....	19
1.4. Фізико-хімічні властивості поверхневого шару деталей машин .....	26
1.4.1. Структурні перетворення та їх вплив на поверхневий шар .....	26
1.4.2. Залишкові напруги поверхневого шару .....	28
1.4.3. Фізичні явища у поверхневому шарі зубчастих коліс, що впливають на його напружений стан .....	29
1.4.4. Термічні процеси при формуванні поверхневого шару.....	31
1.5. Технологічні моделі формування стану поверхневого шару зубчастих коліс .....	33
1.6. Перспективи зубошліфування зубчастих коліс .....	40
1.7. Висновки до розділу 1 .....	42
1.8. Мета і завдання досліджень .....	43
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ЗУБОШЛІФУВАННЯ АБРАЗИВНИМ КРУГОМ.....	44
2.1. Кінематика процесу зубошліфування для оцінки точності профілювання зубів.....	44
2.2. Оцінка динамічної взаємодії абразивного круга з зубчастим колесом .....	55
2.3. Інтенсивність теплового потоку при зубошліфуванні зубчастих коліс .....	64
2.4. Висновки до розділу 2 .....	68

РОЗДІЛ 3 ТЕПЛОНАПРУЖЕНІСТЬ ПРОЦЕСУ ТА ДИНАМІКА ПЕРЕРИВЧАСТОГО ЗУБОШЛІФУВАННЯ ЗА РАХУНОК ФОРМОУТВОРЕННЯ КРУГА .....	70
3.1. Математична модель теплонапруженості процесу переривчастого шліфування .....	70
3.2. Оцінка впливу вібрацій на процес формоутворення поверхневого шару при зубошліфуванні .....	80
3.3. Розробка блок-схеми моделювання переривчастого зубошліфування в пакеті «VisSim» і її аналіз .....	87
3.4. Математична модель в технологічних особливостях переривчастого зубошліфування .....	106
3.5. Висновки до розділу 3 .....	117
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРИВЧАСТОГО ЗУБОШЛІФУВАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС .....	119
4.1. Вплив коливань, що виникають в процесі шліфування на залишкову напругу в поверхневому шарі зубчастих коліс .....	119
4.2. Якість поверхневого шару зуба в зв'язку з конструктивними особливостями зубчастого колеса .....	125
4.3. Вплив інструментального матеріалу на формування поверхневого шару зубчастого колеса .....	130
4.4. Висновки до розділу 4 .....	135
РОЗДІЛ 5 РЕАЛІЗАЦІЯ МОЖЛИВОСТЕЙ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРИВЧАСТОГО ЗУБОШЛІФУВАННЯ В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ .....	136
5.1. Методологія розробки моделі управління якістю і продуктивністю переривчастого зубошліфування при обробці загартованих зубчастих коліс .....	136
5.2. Технологічне забезпечення заданої системи параметрів поверхневого шару циліндричних загартованих зубчастих коліс .....	142
5.3. Техніко-економічний аналіз впровадження удосконаленого процесу переривчастого зубошліфування .....	148

5.3.1. Експлуатаційні умови .....	148
5.3.2. Технічні умови.....	151
5.3.3. Економічні умови.....	153
5.3.4. Оцінка вартості виготовлення зубчастих коліс по методу обкатки переривчастим зубошліфуванням .....	157
5.4. Висновки до розділу 5 .....	160
ВИСНОВКИ.....	161
СПИСОК НАЙМЕНУВАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	163
ДОДАТОК А.....	183
ДОДАТОК Б .....	186