

УДК 621.879

В.Д. КОВАЛЬОВ, Я.В. ВАСИЛЬЧЕНКО, В.С. АНТОНЮК, О.І. ВОЛОШИН, С.В. РЯБЧЕНКО

ТЕХНОЛОГІЧНІ НАПРЯМКИ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНОГО ВИГОТОВЛЕННЯ КРУПНОГАБАРИТНИХ РЕДУКТОРІВ

Плідність роботи полягає в тому, що результати по забезпеченню якісного виготовлення крупногабаритних редукторів знаходяться на рівні світових аналогів. Розроблені нові технологічні напрямки в виготовленні крупногабаритних редукторів з використанням нових вид зубчастих зачеплень з гарантованим рідинним змащуванням зони контакту, нові інноваційні технології виготовлення зубчастих коліс з гідродинамічними карманами для утворення рідинного режиму змащування в зоні контакту. Внаслідок цього забезпечується зниження коефіцієнта тертя, контакт здійснюється через мастильний шар рідини, яка знаходиться на момент утворення контакту в ньютонівському стані рідини завдяки гідрокарманам з утворенням пружно-нестислюваної мастильної рідини. Гідрокармани на евольвентній поверхні ведучого циліндричного зубчастого колеса зубчастої циліндричної передачі забезпечують високу несучу здатність конкатуємих евольвентних поверхонь.

Ключові слова: замкова нарізь, різець, передній кут, кут підйому нарізі, половинний кут профілю отриманої нарізі, кут нахилу різальної кромки, статичний передній кут з нульовим значенням.

Изготовление конических замковых резьбы происходит с помощью резцов с нулевым значением переднего статического угла в вершинной точке и тем самым уменьшаются технологические возможности, по увеличению технологической стойкости инструмента в условиях обработки труднообрабатываемых материалов из которых часто изготавливают буровые замки. В статье предложен алгоритм и программное приложение на основе него, которое позволяет провести анализ влияния переднего угла и угла подъема резьбы на величины отклонений половинных углов профиля полученной резьбы. Получены выводы, которые свидетельствуют о возможности применения указанного приложения в подготовке и проведении дальнейших исследований влияния точности установки инструмента, его геометрических параметров и технологических факторов процесса на точность полученного профиля замковой резьбы.

Ключевые слова: важке машинобудування, інноваційні технології, великогабаритні редуктора, новий вид зубчастих зачеплень, демпфірування, пульсації навантаження, підвищення якості, точність, продуктивність.

The article describes the results of the work to ensure the quality production of large-size gearboxes. Based on the use of modern technology in machine building and the generalization of scientific achievements in the gearshift of hardened coarse-grained cogwheels and the requirements for heavily loaded and critical gears, the general principles for the development of new innovative technologies and schemes for shaping gears using the modern capabilities of numerical software Management and development of new machine tools. This provides an improvement in the quality and accuracy of cogwheels up to 12 m in diameter, a module up to 65 mm and processing capacity 3-6 times. New technological directions for the manufacture of large-sized gearboxes using new types of gearing with guaranteed liquid lubrication of the contact zone, new innovative technologies for manufacturing gears with hydrodynamic pockets for the formation of a liquid lubrication regime in the contact zone have been developed. Hydrokams on the involute surface of the leading cylindrical gear wheel provide a high load-bearing capacity of the curable involute surfaces. Such gear cylindrical gears provide high damping of pulsating load of gears of large-sized reducers, allow to reduce a technological heredity of errors of processing of the interfaced surfaces of cogwheels and reducer housings.

Keywords: dragline Heavy engineering, innovative technologies, large-size reduction gears, a new kind of gearing, damping, pulsating load, improving quality, accuracy, productivity.

Постановка проблеми. Підвищення ефективності промислового виробництва в значній мірі пов'язане з розробкою й освоєнням гірничодобувного й переробного устаткування, транспортних, енергетичних систем, приводи яких містять крупногабаритні редуктори масою до 50т з крупномодульними зубчастими передачами ($m=12...65\text{мм}$).

Ефективна експлуатація крупногабаритних редукторів (рис. 1) виробів важкого машинобудування прат НКМЗ в значній мірі залежить від контактної міцності зубчастих коліс, яка збільшується з підвищенням поверхневої твердості зубів.



Рис. 1 – Рудорозмельний млин з зубчастими передачами виготовлений по інноваційній технології

Несуча здатність зубчастих передач по контактній міцності збільшується з підвищенням поверхневої твердості зубів. Підвищення твердості поверхні зубів з HRC32 до HRC60 дозволяє вдвічі зменшити габарити редуктора і в 3 рази зменшити його масу [1-2].

Однак висока трудомісткість виготовлення загартованих крупномодульних зубчастих коліс обмежує їх застосування через значні припуски, які призначають на операціях зубошліфування для усунення дефектів після термообробки, можливість утворення припиків і мікротріщин, обмеження в розмірах зубчастих коліс, що установлюються на зубошліфувальних верстатах.

З іншого боку, висока ймовірність відмови в роботі крупномодульних незагартованих зубчастих коліс, для яких з технологічних причин неможливо виконати зубошліфування, при їх значних розмірах та масі значно підвищує витрати на їх виготовлення. В той же час підвищення твердості поверхні зубів з HRC32 до HRC60 дозволяє вдвічі зменшити габарити редуктора та в 3 рази зменшити масу [1-2].

Тому розробка технологічних основ забезпечення продуктивності, точності та якості обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс є актуальною проблемою важкого машинобудування [3].

Аналіз попередніх досліджень. Виготовити високоточні загартовані крупномодульні зубчасті коле-

са, ступінь точності яких 6В...8В (ГОСТ1643-81), що працюють у широких діапазонах зміни швидкостей (від 0,5 до 30 м/с), потужностей (від 50 Квт до 500000 Квт), мають діаметри до 12000 мм, ширину зубчастого вінця до 1200 мм, модуль до $m=65$ мм, у багатьох випадках практично неможливо через відсутність технологічного устаткування, інструментального забезпечення, технологічних регламентів чистової зубообробки та недостатність досліджень з питань забезпечення якості поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс [3].

Мета роботи. Для обробки крупномодульних зубчастих коліс із високою зносостійкістю зубців, з високими властивостями міцності поверхневого шару доцільно дослідити технологічні напрямки остаточної обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс для забезпечення необхідних параметрів шорсткості поверхні, якості зубофрезерування з досягненням високої продуктивності.

Тому розробка технологічних основ забезпечення продуктивності, точності та якості зубофрезерування загартованих крупномодульних зубчастих коліс є актуальною проблемою важкого машинобудування. На рис. 2 наведені приклади обробки зубчастих коліс крупногабаритних редукторів ПрАТ НКМЗ за інноваційними технологіями.

Виклад основного матеріалу. На основі використання сучасних положень технології машинобудування і узагальнення наукових досягнень в зубообробці загартованих крупномодульних зубчастих коліс і вимог до важконавантажених та відповідальних зубчастих передач вперше сформульовані і реалізовані загальні принципи розробки нових інноваційних технологій та схем формоутворення зубчастих коліс з

використанням сучасних можливостей числового програмного керування та розробкою нового верстатного обладнання. Це забезпечує підвищення якості та точності зубчастих коліс діаметром до 12 м, модулем до 65 мм та продуктивності обробки в 3-6 раз.

Реалізація інноваційних технологій обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс виконується:

- на оброблювальному центрі з нарізанням зубців на вінцях зубчастих коліс діаметром до 12 м (суміщення технологічних операцій токарно-карусельної і зубофрезерної);

- на токарному оброблювальному центрі виконується нарізання зубців на вал-шестернях, в т.ч. і з закритими шевронами діаметром до 1500 мм і довжиною до 8 м, виконується нарізка витків глобоїдних і архімедівських черв'яків (суміщення технологічних операцій токарної і зубофрезерної);

- на розточувальному верстаті з ЧПК - виконується нарізання зубців черв'ячних глобоїдних і архімедівських коліс;

- на поздовжньо-фрезерному оброблювальному центрі (суміщення технологічних операцій токарної, зубофрезерної і будь-якої операції, що вимагає свердлильно-фрезерно-розточувальну групу обладнання);

- на зубошліфувальному верстаті виконується обробка деталей конічного зачеплення;

- на вертикально-фрезерному верстаті з ЧПК - виконується нарізування зубців на колесах зубчастих діаметром до 5м.

Впровадження інноваційних технологій обробки крупномодульних зубчастих коліс дозволило вивести з експлуатації близько 15 одиниць застарілих верстатів.

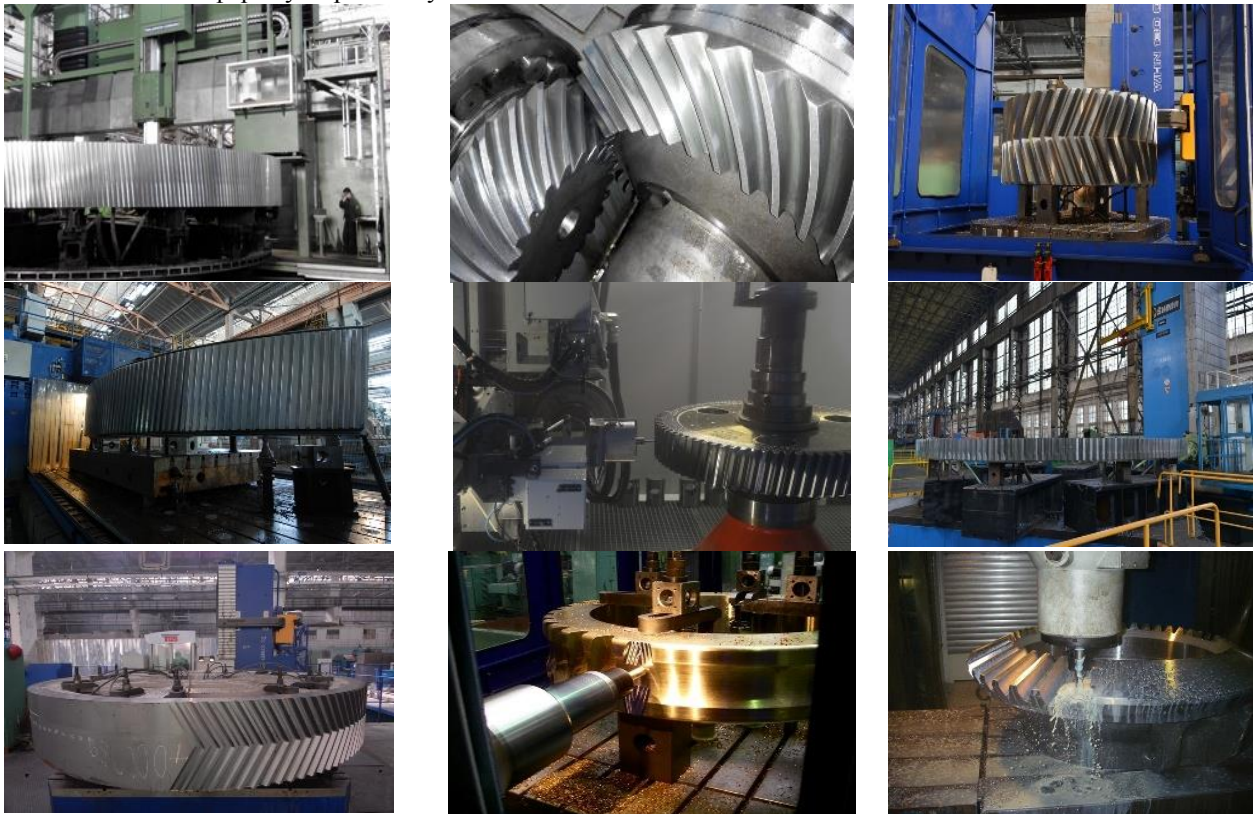


Рис. 2 – Приклади обробки зубчастих коліс за інноваційними технологіями

Раніше традиційна технологія нарізування кругового зуба на НКМЗ виконувалася на верстатах Саратовського верстатозаводу лезовим інструментом виробництва НКМЗ - зуборізними головками з швидкорізальними різцями, що в кращому випадку забезпечувало восьму ступінь точності і шорсткість поверхні $R_a=3,2\text{мкм}$. У зв'язку з відсутністю можливості обробки таких зубців з високою твердістю (до 61 HRC) існувало обмеження з виготовлення конічних зубчастих передач зі зміцненими зубцями високої точності.

Нова технологія реалізована з використанням комплексу обладнання, що включає: фрезерно-токарний оброблювальний центр, зубошліфувальні верстати з ЧПК, контрольно-обкатний верстат з ЧПК; контрольно-вимірювальну машину з ЧПК, об'єднує всі етапи підготовки виробництва і безпосередньо етапи виготовлення конічних передач в наскрізний потік.

Це відображено в нормативних документах «Схема проектування, виготовлення, вимірювання, коригування та контролю готової продукції». Управління виробництвом деталей конічних зубчастих передач з криволінійним зубом на всіх етапах відбувається за системою EMS (Expert Manufacturing System). На кожному етапі всі процеси автоматизовані і виконуються за допомогою спеціального програмного забезпечення.

В одному з них конструктор створює математичну модель конічного зачеплення з виконанням аналізу міцності і необхідної плями контакту зчеплення, результатом якого є файл даних, який передається на фрезерно-токарний оброблювальний центр або на зубошліфувальні верстати.

Реалізація інноваційних технологій виконується на оброблювальних центрі «Heller», який призначений для виготовлення великих зубчастих коліс, діаметром до 1800 мм. Це - унікальний верстат, на якому можлива лезова обробка зубців після зміцнення, коли твердість поверхні зуба становить HRC 60. При цьому досягається фактично «шліфовувана» поверхня з шорсткістю $R_a=1,25\ldots1,6\text{ мкм}$. Обробний центр «Heller» дозволяє вести обробку практично будь-якого типу конічного зубчастого зачеплення (наприклад, круговий або прямий зуб, палюдне і цикло- палюдне зачеплення, зачеплення Klingelberg).

Розроблені технологічні засоби зубофрезерування загартованих крупномодульних зубчастих коліс, які неможливо було виконувати на існуючому обладнанні та розроблена перспективна технологічна схема швидкісного зубофрезерування загартованих крупномодульних зубчастих коліс замість зубостругальної операції з забезпеченням якості поверхневого шару з урахуванням радіуса округлення різальної крайки інструменту, який збільшується протягом часу, що забезпечило підвищення ефективності швидкісного зубофрезерування зі зменшенням кута ковзання і збільшенням кута, на якому здійснюється зрізання поверхневого шару. Схеми впроваджених технологічних процесів зубообробки загартованих зубчастих коліс за інноваційними технологіями наведені в табл.1.

Впровадження зубошліфувального верстата

«Phoenix» забезпечує якісні показники 4-5 ступені точності. Спеціалізація цього верстата - більш дрібні деталі діаметром до 800мм. Його унікальність в здатності шліфувати з «нуля», без попереднього формоутворення дорогими фрезами або різцевими головками за традиційною технологією.

Також впроваджено нові процеси шліфування крупномодульних зубчастих коліс на зубошліфувальних верстатах «Gleason-Pfauter». Для цих верстатів Інститутом надтвердих матеріалів спільно з абразивною фірмою ДП «БЕСТ-БІЗНЕС» розроблені та впроваджені спеціальні шліфувальні круги з хромтитаністого рубін-корунду форми Т2 (форма кільця) діаметром від 178 мм до 564 мм та висотою до 90 мм.

Перспективним інструментом для шліфування зубчастих коліс є високопористі абразивні круги з монокристалічного корунду для профільного шліфування на верстатах «Gleason-Pfauter».

Завершальним етапом роботи виготовлення зубчастих коліс для важкого машинобудування є контроль якості зубчастого колеса.

Готові деталі зубчастого зачеплення надходить на контрольно-вимірювальну машину з ЧПК де виконується контроль параметрів, наприклад, крок, похибки профілю, відхилення напрямку лінії зуба, радіальне биття зубчастого вінця тощо.

Отже, готова деталь зубчастого зачеплення надходить на контрольно-вимірювальну машину з ЧПК. Конструктор створює еталон - спеціальний файл вимірювання, який по мережі передається на вимірювальну машину.

Машина виконує вимірювання бічної поверхні зубів, торкаючись її вимірювальним щупом. Потім спеціальне програмне забезпечення виконує порівняння результатів вимірювань з математичним еталонною деталі і видає величини відхилень. На даній машині можна виконати контроль декількох десятків параметрів, наприклад, крок, похибка профілю, відхилення напрямку лінії зуба, радіальне биття зубчастого вінця тощо.

Похибки форми зуба впливають на пляму контакту - одну з найважливіших характеристик будь-якої зубчастої передачі. Перевірка плями контакту виконується на контрольно-обкатному верстаті при безпосередній установці на ньому двох деталей зубчастого зачеплення - шестерні і колеса. Система ЧПК об'єднана з виробничим програмним комплексом.

Основні переваги програмного забезпечення для контрольно-вимірювальних машин:

- контроль сполучення робочих поверхонь зуба для конічних шестерень забезпечує стабільне положення вимірюваної деталі;

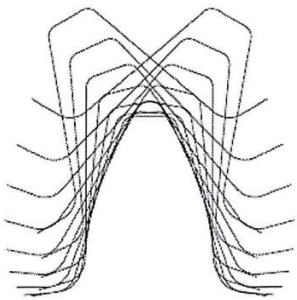
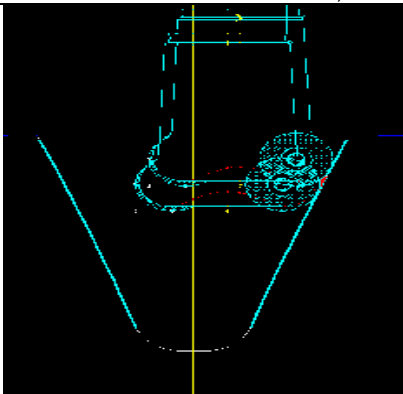
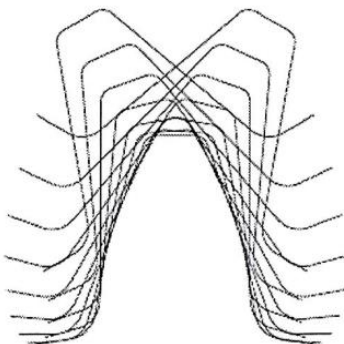
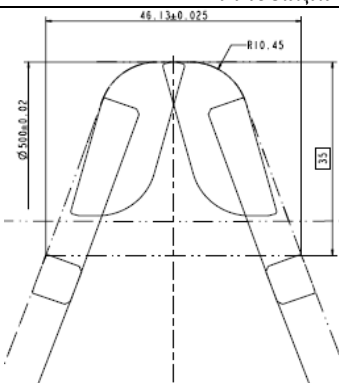
- процес вимірювання від початку до кінця побудований у формі діалогу і максимально спрощений для оператора;

- результати контролю автоматично зберігаються на робочому місці, їх можна використовувати для коригування параметрів програми шліфувального верстата або передавати на заводський сервер;

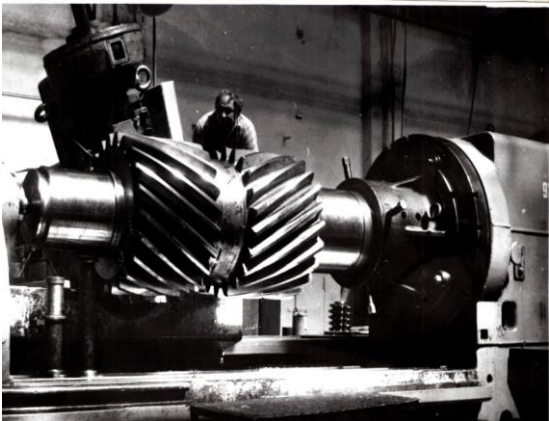
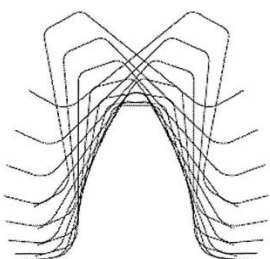
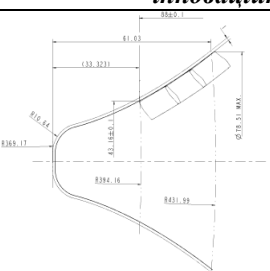
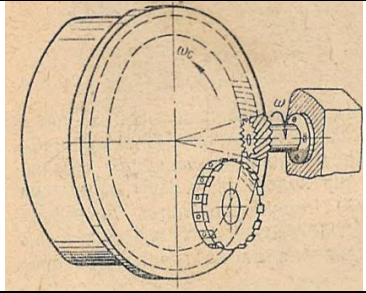
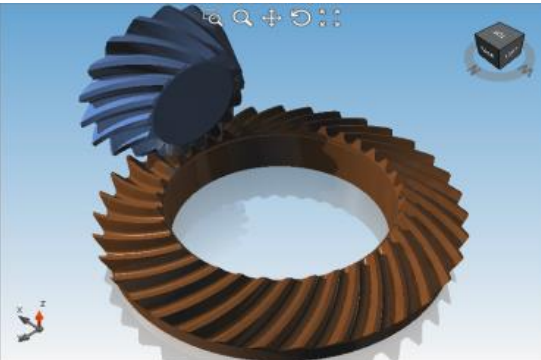
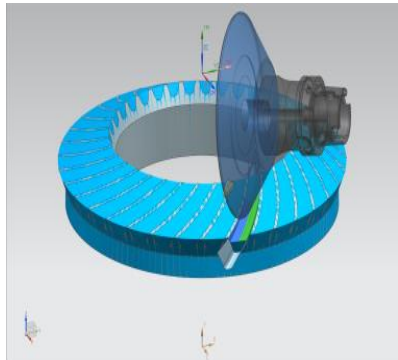
- аналіз відповідності нормам або самостійно заданими допусками відбувається автоматично.

Таблиця 1

Схеми зубообробки загартованих зубчатих коліс за інноваційними технологіями

Нарізання зубів на вінці зубчастому з модулем 50мм.		
- Модуль 50мм; - Число зубів 168; - Зовнішній діаметр вінця 8490мм; - Ширина вінця 360мм; - Кут нахилу зуба 0°; - Ступінь точності 9. 	традиційна технологія	
	Схема формоутворення западини зуба	устаткування, різальний інструмент, трудомісткість роботи
	 метод обкату	Зубостругальний верстат «Maag»; гребінки зі швидкорізальної сталі; 1250 ст. н. ч.
	інноваційна технологія	
		Портальний обробний центр «Waldrich Coburg – PowerTec» 7500 AG-S2; дискові та кінцеві фрези з ЗНП; 371 ст. н. ч.
Нарізання зубів на вінці зубчастому з модулем 28мм.		
 - Модуль 28мм; - Число зубів 336; - Зовнішній діаметр вінця 9527,66мм; - Ширина вінця 900мм; - Кут нахилу зуба 6°; - Ступінь точності 8.	традиційна технологія	
	Схема формоутворення западини зуба	устаткування, різальний інструмент, трудомісткість роботи
	 метод обкату	Зубостругальний верстат «Maag»; гребінки зі швидкорізальної сталі; 1497 ст. н. ч.
	інноваційна технологія	
	 метод копіювання	Портальний обробний центр «Waldrich Coburg – PowerTec» 7500 AG-S2»; дискові фрези з ЗНП; 179 ст. н. ч.

Продовження табл. 1

Нарізання зубів на вал-шестерні з модулем 28мм.		
- Модуль 28мм; - Число зубів 28; - Зовнішній діаметр вінця 863,98мм; - Ширина вінця 920мм; - Кут нахилу зуба 6 °; - Ступінь точності 8. 	традиційна технологія	
	 метод обкату (Чистове обробка)	Зубофрезерний верстат для нарізання пальцевими фрезами, Пальцеві фрези зі швидкорізальної сталі, зубофрезерний верстат, черв'ячна фреза зі швидкорізальної сталі, 122,5 ст. н. ч.
	інноваційна технологія	
	 метод копіювання	Токарний обробний центр «Waldrich Siegen DHL» 1500x8000; пальцеві фрези з ЗНП; 32 ст. н. ч.
Нарізання зубів на колесі конічному з круговим зубом.		
- Модуль 10мм; - Число зубів 35; - Зовнішній діаметр колеса 505мм; - Ширина вінця 99мм; - Кут нахилу зуба 35 °, тип - кругової; - Ступінь точності 8 - традиційна технологія; - Ступінь точності 6 - інноваційна технологія.	традиційна технологія	
		Зуборізний верстат для нарізання конічних коліс з круговим зубом; різцева голівка з різцями зі швидкорізальної сталі; 27 ст. н. ч.
	інноваційна технологія	
		Поздовжньо-фрезерний обробний центр «GLEASON PFAUTER-HELLER - CT8000»; дискові фрези з ЗНП; 6,5 ст.н.ч. (Але це з обробкою до і після зміцнення зубців);

Впровадження зубошліфувального верстата «Phoenix» забезпечує якісні показники 4-5 ступені точності. Спеціалізація цього верстата - більш дрібні деталі діаметром до 800мм. Його унікальність в здатності шліфувати з «нуля», без попереднього формоутворення дорогими фрезами або різцевими головками за традиційною технологією.

Також впроваджено нові процеси шліфування крупномодульних зубчастих коліс на зубошліфувальних верстатах «Gleason-Pfauter». Для цих верстатів Інститутом надтвердих матеріалів спільно з абразивною фірмою ДП «БЕСТ-БІЗНЕС» розроблені та впроваджені спеціальні шліфувальні круги з хромтитаністого рубін-корунду форми Т2 (форма кільця) діаметром

від 178 мм до 564 мм та висотою до 90 мм.

Перспективним інструментом для шліфування зубчастих коліс є високопористі абразивні круги з монокристалічного корунду для профільного шліфування на верстатах «Gleason-Pfauter».

Завершальним етапом роботи виготовлення зубчастих коліс для важкого машинобудування є контроль якості зубчастого колеса.

Готові деталі зубчастого зачеплення надходять на контрольно-вимірювальну машину з ЧПК де виконується контроль параметрів, наприклад, крок, похибки профілю, відхилення напрямку лінії зуба, радіальне биття зубчастого вінця тощо.

Отже, готова деталь зубчастого зачеплення надходить на контрольно-вимірювальну машину з ЧПК. Конструктор створює еталон - спеціальний файл вимірювання, який по мережі передається на вимірювальну машину.

Машина виконує вимірювання бічної поверхні зубів, торкаючись її вимірювальним щупом. Потім спеціальне програмне забезпечення виконує порівняння результатів вимірювань з математичним еталоном деталі і видає величини відхилень. На даній машині можна виконати контроль декількох десятків параметрів, наприклад, крок, похибка профілю, відхилення напрямку лінії зуба, радіальне биття зубчастого вінця тощо.

Похибки форми зуба впливають на пляму контакту - одну з найважливіших характеристик будь-якої зубчастої передачі. Перевірка плями контакту виконується на контрольно-обкатному верстаті при безпосередній установці на ньому двох деталей зубчастого зачеплення - шестерні і колеса. Система ЧПК об'єднана з виробничим програмним комплексом.

Основні переваги програмного забезпечення для контрольно-вимірювальних машин:

- контроль сполучення робочих поверхонь зуба для конічних шестерень забезпечує стабільне положення вимірюваної деталі;

- процес вимірювання від початку до кінця побудований у формі діалогу і максимально спрощений для оператора;

- результати контролю автоматично зберігаються на робочому місці, їх можна використовувати для коригування параметрів програми шліфувального верстата або передавати на заводський сервер;

- аналіз відповідності нормам або самостійно заданими допусками відбувається автоматично.

Програма містить модуль, за допомогою якого можна розглядати циклограму випробувань цілком і автоматично розкласти її на дрібні цикли із заданою періодичністю, що, в свою чергу, дозволяє оцінити результати випробувань з мінімальною статистичною похибкою.

У програмі передбачений математичний фільтр, що збільшує або зменшує дозвіл при контролі топографії. Тут же можуть бути зафіксовані величини монтажних відстаней, на яких реалізована пляма контакту. Їх можна використовувати при складанні редуктора або механізму, в якому дана пара буде працювати.

Інноваційні технології мають такі відмінні риси у порівнянні з традиційними технологіями:

- замість швидкохідних фрез, різців, гребінок

використовуються високопродуктивні фрези з ЗНП або фрези, отримані методом порошкової металургії і мають зносостійкі покриття;

- істотно скорочується допоміжний час за рахунок об'єднання технологічних операцій при використанні обробних центрів;

- не потрібно виконувати розрахунок і установку спеціальних кінематичних ланцюгів верстата, так званих «гітар», тому що нарізка зубців ведеться по керуючим програмам;

- практично немає обмежень з максимально можливого оброблюваного модулю, тому що на верстатах з ЧПК і ОЦ використовуються стандартні різальні інструменти, а обробка поверхонь зубів виконується по керуючій програмі;

- підвищується якість оброблюваних деталей - досягається 5 ступінь точності і шорсткість Ra 1,6 мкм проти 8 ступеня точності і шорсткості Ra 3,2 мкм за традиційними технологіями.

Традиційний парк зубообробляючих верстатів дозволяв вести обробку в обмежених рамках - можливостей технологічної системи «верстат - різальний інструмент». Інноваційні ж технології виготовлення різних крупномодульних зубчастих передач для важкого машинобудування засновані на наскрізній системі «проекування - виробництво - вимір», що дозволяє на основі будь-яких необхідних видів зубчастих зачеплень і профілів, характеристик зачеплення і передачі в цілому розробити графічну модель передачі з її математичним описом в «CAD-CAM» системах з можливістю управління модифікаціями бічної поверхні зубів і плямою контакту в зачепленні [3]. За цими моделями розробляються технології і генеруються керуючі програми обробки на багатофункціональних обробних центрах з використанням універсального різального інструменту, з подальшим вимірюванням результатів обробки і при необхідності - коригування керуючих CNC-програм за результатами контролю.

Вперше визначений і математично описаний взаємозв'язок експлуатаційних властивостей поверхонь крупномодульних загартованих зубчастих коліс з їх показниками якості, що дозволило вирішити основну технологічну проблему зубооброблення - забезпечення продуктивності, точності і якості крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані. Встановлені і науково обґрунтовані комплексні параметри оцінки поверхневого стану крупномодульних загартованих зубчастих коліс після лезової обробки.

Розроблений механізм технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь зубців крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, на основі математичного структурно-параметричного моделювання процесу їх обробки. Сформульовано наукове положення по технологічному оснащенню для інтенсивної і високоякісної зубообробки.

Розроблені практичні рекомендації по вживанню технології швидкісного зубофрезерування з призначенням і забезпеченням параметрів поверхневого шару крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.

Наукова новизна роботи «Розробка, створення та впровадження інноваційних технологій виготовлення крупногабаритних редукторів для виробів важкого машинобудування» полягає в наступному:

– на основі широкого аналізу та узагальненню промислових досягнень в зубообробці загартованих крупномодульних зубчастих коліс, вимог до важконавантажених і відповідальних зубчастих передач вперше сформульовані і реалізовані принципи забезпечення високої продуктивності, точності та якості чистового зубофрезерування при оптимізації структури і параметрів технологічної дії та наукові основи підвищення вимог до розробки інструментального і технологічного оснащення при умовах обмежень на якість поверхневого шару зуба зубчастого колеса;

– вперше розроблені технологічні засоби зубофрезерування загартованих крупномодульних зубчастих коліс, які неможливо було виконати на існуючому обладнанні за рахунок відсутності можливості зубошліфування;

– розроблена нова технологічна схема швидкісного зубофрезерування загартованих крупномодульних зубчастих коліс з використанням нових технологічних рішень формування поверхневого шару з урахуванням ролі радіуса округлення різальної кромки інструменту;

– впровадженні дослідження по визначенню та математичному опису взаємозв'язків експлуатаційних властивостей поверхонь загартованих крупномодульних зубчастих коліс з показниками якості, що дозволило вирішити основну технологічну проблему зубофрезерування - забезпечення продуктивності, точності і якості зубообробки;

– запроваджено перспективний підхід до вибору методів обробки поверхонь зубців коліс на основі використання математичного апарату відповідностей, який базується на положеннях розрахунку вимог до поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс за допомогою графів, параметрів стану поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс залежно від умов обробки, ступеня впливу параметрів хвилястості на експлуатаційні властивості загартованих крупномодульних зубчастих коліс, керування якістю й продуктивністю формування при зубофрезеруванні;

– науково обґрунтовані комплексні параметри оцінки стану поверхонь загартованих крупномодульних зубчастих коліс після лезової обробки, оцінки довговічності загартованих крупномодульних зубчастих коліс та мінімально можливих пластичних деформацій зубів загартованих крупномодульних зубчастих коліс;

– уперше розроблений механізм технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь зубців загартованих крупномодульних зубчастих коліс на основі математичного структурно-параметричного моделювання процесу обробки;

– застосування комплексного параметру стану зуба в умовах багатокритеріальної оптимізації двоступінчастого технологічного процесу обробки вперше дозволило науково обґрунтувати взаємозв'язок технологічного впливу на зуб колеса з параметрами якості зубчастого зачеплення крупномодульної циліндричної передачі;

– запропоновано математичний опис взаємозв'язків якісних і кількісних показників поверхневого шару зуба колеса й експериментально підтверджені

загальні принципи керування параметрами точності, якості й продуктивності зубофрезерування загартованих крупномодульних зубчастих коліс;

– уперше розроблена імітаційна модель керування технологічним процесом фінішної лезової обробки зубців коліс на основі обмежень по якості й точності формованих зубців;

– сформульовано наукове положення по технологічному оснащенню для інтенсивної й високоякісної зубообробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс.

Сформульована структурна постановка до формування поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс з забезпеченням основних напрямків підвищення продуктивності, точності і якості зубообробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс на її основі.

Основними напрямками технологічного забезпечення продуктивності, параметрів стану поверхневого шару і якості зубообробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс є розробка й дослідження інноваційних технологічних методів формування поверхневого шару і альтернативних зубошліфуванню технологій.

При призначенні параметрів стану контактуючих поверхонь циліндричних КЗКЗ установлені можливості інноваційних технологічних методів обробки по забезпеченню параметрів поверхневого шару шорсткості (R_{max} , R_a , R_z , R_p , S_m , S), хвилястості (W_a , W_p , S_m) і фізико-механічних властивостей поверхневого шару ($k=(H_{\mu 0}/H_{\mu})\cdot 100\%$, $h_{\mu 0,\pm\sigma_0,h_{\sigma_1}}$).

На основі цих показників введено комплексний параметр стану поверхні, який характеризує певні експлуатаційні властивості через систему параметрів її якості й змінює свої значення в процесі припрацювання поверхонь, незалежно від вихідних значень, отриманих обробкою.

Процес зубофрезерування безупинно вдосконалюється в напрямку підвищення продуктивності й точності обробки. Можливості підвищення продуктивності зубофрезерування визначаються аналізом формули основного технологічного (машинного) часу t_0 .

На процес формування поверхневого шару суттєво впливає утворення хвилястості залежно від методів і режимів зубообробки. Висота хвилястості утвореної на евольвентній поверхні циліндричного зубчастого колеса при зубообробці визначається у відповідності з правилами підсумовування випадкових величин.

На основі оцінки взаємодії структурних процесів формування хвилястості поверхневого шару, отримані залежності знаходження параметричних показників.

Керування параметрами точності, якості й продуктивності зубообробки вирішено методами технологічного впливу з урахуванням кінематичних рухів зуборізного інструменту, залежності шорсткості поверхневого шару, який утворюється за рахунок постійних змін геометрії різальної частини інструмента, що необхідно обов'язково урахувувати при швидкісному зубофрезеруванні.

При організації серійного виробництва нових крупногабаритних редукторів удосконалювались існуючі та впроваджувались нові технології виготов-

Однак, у виробництві крупногабаритних редукторів, як би не важливим було виробництво валів редукторів, основним є виробництво та методи обробки зубчастих коліс, тому що зубчасті колеса визначають експлуатаційні характеристики зубчастих редукторів [1, 5-6].

При виготовленні циліндричних зубчастих коліс, що працюють при високих знакозмінних навантаженнях в умовах високих контактних напружень, необхідно витримувати задані параметри якості поверхневого шару, зокрема шорсткість поверхні, глибину й ступінь наклепу, залишкові напруження.

На рис. 3 показано алгоритм розробки інноваційних технологій при багатокритеріальній оптимізації обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс.

У табл. 2 наведені методи зубообробки для забезпечення параметрів стану поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчастих коліс.

Відзначено, що зі схем різання для дискових фрез, які оснащені мінералокерамікою (III, IV) найбільш ефективною є схема IV. Тут шлях обкату – найменший, але необхідно враховувати величину допоміжного часу, пов'язаного з перестановкою інструмента й підналагодженням заготовки колеса.

Схема III є другою за ефективністю. Недолік її полягає в тому, що через великий вихідний зсув інструменту щодо осі колеса на існуючих верстатах ВАТ “КЗТС” (м. Коломна) можлива обробка косозубих коліс тільки із зовнішнім діаметром до 800 мм.

Схема IV зручна в експлуатації, тому що не вимагає перестановки фрез (рис.4).

Для чистової обробки загартованих коліс на верстатах фірми “МААГ” розроблені дві конструкції спеціальних фрезерних супортів: одношпindelна, яка реалізує схему III, і двошпindelна, яка реалізує схему різання IV (рис.4)..

Розроблені інноваційні технології дозволяють підвищити продуктивність в 3-6 раз із забезпеченням якості та 5- го ступеню точності.

Раніше зубчасті колеса такого рівня закуповувались в Німеччині. Розроблені технології дозволили

забезпечити імпортозаміщення, а також створення важких машин нового покоління (рудорозмельні млини, прокатні стани, енергетичне обладнання, поворотні платформи важких екскаваторів, важкі верстати тощо). Випуск таких виробів вітчизняного важкого машинобудування дозволив знайти нові експорти ринки та забезпечити створення нових робочих місць з високою інтелектуальною складовою.

Плідність роботи полягає в тому, що результати роботи знаходяться на рівні світових аналогів. Наприклад, вперше в світовій практиці розроблено новий вид зубчастих зацеплень з гарантованим рідинним змащуванням зони контакту.

Розроблені інноваційні технології можуть використовуватись в оборонній промисловості при виготовленні приводів важкої броньованої техніки з забезпеченням роботи на форсованих режимах.

Вперше у світовій практиці розроблені інноваційні технології виготовлення зубчастих коліс з гідродинамічними карманами для утворення рідинного режиму змащування в зоні контакту з використанням пружно-нестисливої рідини [5, 7].

Внаслідок цього забезпечується зниження коефіцієнта тертя, контакт здійснюється через мастильний шар рідини, яка знаходиться на момент утворення контакту в неньютоновському стані рідини завдяки гідрокарманам з утворенням пружно-нестислової мастильної рідини. Гідрокармани на евольвентній поверхні ведучого циліндричного зубчастого колеса зубчастої циліндричної передачі забезпечують високу несучу здатність контактуємих евольвентних поверхонь, малий коефіцієнт тертя в широкому діапазоні частот обертання.

Такі зубчасті циліндричні передачі забезпечують високе демпфування пульсаційного навантаження зубчастих коліс крупногабаритних редукторів виробів важкого машинобудування, дозволяють зменшення технологічного успадковування похибок обробки спряжених поверхонь зубчастих коліс та корпусів редукторів.

Таблиця 2

Можливості методів зубообробки в забезпеченні системи параметрів стану поверхневого шар загартованих циліндричних крупномодульних зубчастих коліс

Метод обробки	Параметри стану поверхневого шару								Фізико-механічні властивості поверхневого шару			
	Шорсткості					Хвилястості						
	R_a <i>мкм</i>	R_z <i>мкм</i>	R_p <i>мкм</i>	S_m <i>мм</i>	S <i>мм</i>	W_z <i>мкм</i>	W_m <i>мкм</i>	S_{mw} <i>мм</i>	$k=H_\mu$ $\sigma/H_\mu\%$	h_μ <i>мм</i>	σ_0 <i>Мпа</i>	h_σ <i>мм</i>
Зубофрезерування	4,5	60	50,0	0,5	0,1	8,0	5,0	2,5	120	0,2	250	0,1
	2,5	40	16	0,3	60		16	10,0	180	—	—	0,2
	0,9	20	4,0	—	—	25,0	0,63	0,8-4,0	110	0,5	300	0,08
Швидкісне зубофрезерування	1,9	16,	10,0	1,2	1,2	12,5	8,0	2,5	110	0,15	300	0. 015
	0,8	0	—	5	5-	—	40	12,0	180	—	—	—
	0,40		30	—	5,0	60,0	2,0	0,8	100	0,25	350	0,25
	0,20	50	2,5	5,0	0,3	3,0	12,5	8,0	150	0,08	200	0,10
Накатування конічними роликками	1,8	32	16,0	0,2	0,2	12,5	6,3	2,5	130	0,25	250	0,16
	0,8	—	—	0	0		25	15,0	190	—	—	—
	0,40	200	125	—	1,6	40,0	1,25	0,8	120	0,6	350	0,28
	0,20											

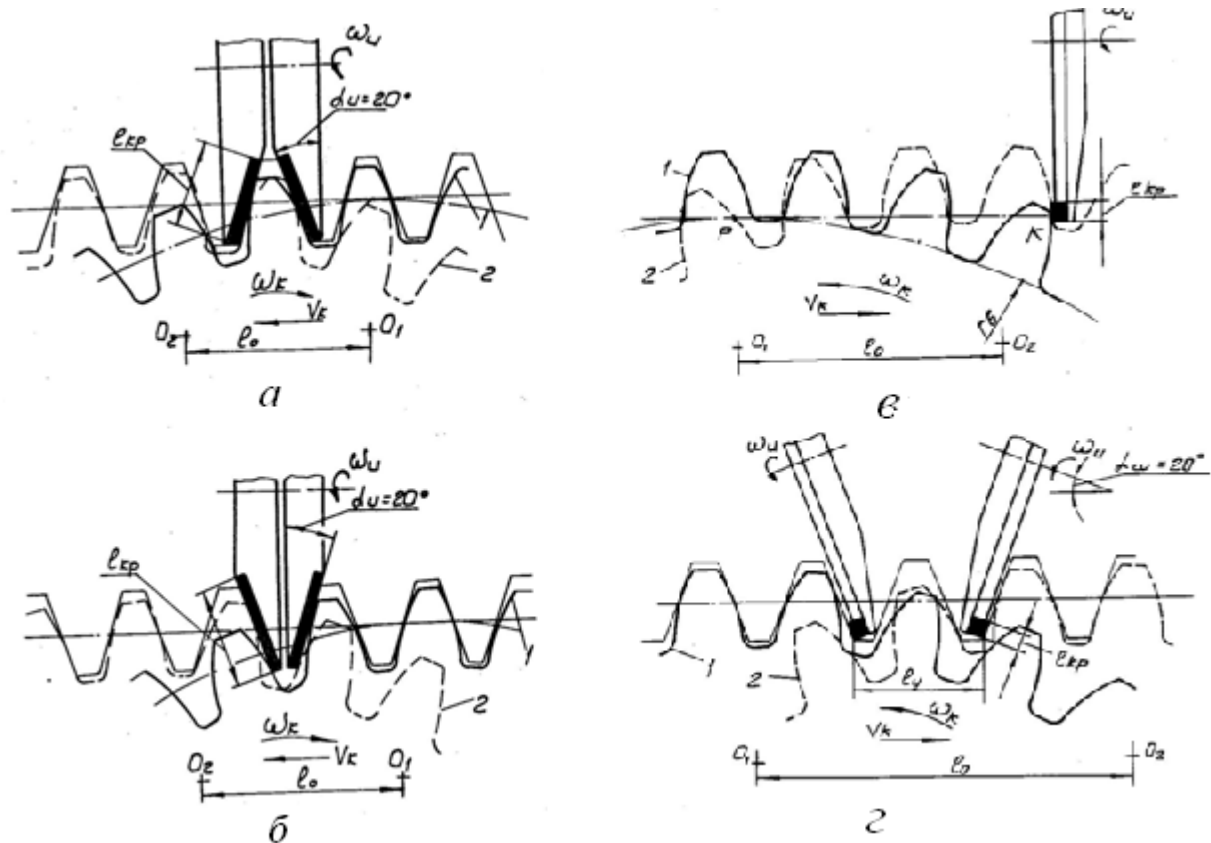


Рис. 4—Перспективні технологічні схеми швидкісного зубофрезерування дисковими немодульними фрезами: а - схема різання I; б - схема різання II; в - схема різання III; г - схема різання IV

Запропонована конструкція зубчастої циліндричної передачі з гідродинамічними карманами забезпечує високу несучу здатність циліндричних коліс, забезпечується підвищення кінематичної точності, плавності, бокового зазору.

Підвищення ефективності експлуатації важких редукторів забезпечується також розробленою технологічною схемою навантаження циліндричних коліс циліндричної передачі у якій кожний зуб шестерні контактує з кожним зубом зачіпляемого колеса, що забезпечує повну рівномірну приробітку всіх зубів. Раніше кожний зуб шестерні контактував тільки з одним, чи кілька зубами зачіплюваемого колеса, що негативно впливало на нестабільність роботи крупногабаритних редукторів, створювало підвищений шум та вібрації.

Використовуючи новітні технології по створенню, розробці та впровадженню інноваційних розробок по виготовленню крупномодульних зубчастих передач на ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» виготовлюється продукція світового рівня з забезпеченням якості, точності та довговічності експлуатації машин (рис. 5, 6).

Практичне значення отриманих результатів для машинобудівельної галузі полягає в розроблені та виготовленні гами крупногабаритних редукторів для виробів важкого машинобудування, які за своїми технічними характеристиками знаходяться на рівні кращих закордонних аналогів *BEML*, *BUCYRUS*, *HEC*, *P&H*, *SENNEBOGEN*, *CNcrusher Us*, *Caterpillar* и др.



Рис. 5 – Важкий 3-осний редуктор з зубчастими передачами виготовлений по інноваційній технології



Рис. 6 – Важкий 6-осьовий редуктор з зубчастими передачами виготовлений за інноваційній технології

Висновки. Розроблені перспективні технологічні процеси швидкісного зубофрезерування із забезпеченням якості поверхневого шару й експлуатаційних характеристик загартованих крупномодульних зубчатих коліс. Запропоновано універсальну методику багатокритеріальної оптимізації параметрів стану поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчатих коліс в залежності від умов їхньої обробки, яка забезпечує експлуатаційні властивості крупногабаритних редукторів виробів важкого машинобудування.

Вперше в світовій практиці розроблено новий вид зубчастих зацеплень редукторів з гідродинамічними карманами і гарантованим рідинним змащуванням зони контакту з використанням пружно нестисливої рідини та некротним зацепленням зубчастих коліс.

Вирішена проблема спеціального технологічного оснащення та інструментального забезпечення високопродуктивної обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс та основних деталей редукторів на основі нових надтвердих матеріалів, інструментальної кераміки, зміцнюючих покриттів на інструментальних матеріалах а також оптимізації геометричних параметрів фрез для високоякісної зубообробки зубчастих коліс, яка суттєво підвищила продуктивність, якість та точність виготовлення, також технічні та експлуатаційні крупногабаритних редукторів. Для різальних швидкісних фрез з надтвердих матеріалів, інструментальної кераміки вперше отримане відносне співвідношення радіусу ріжучої округлені різальної кромки та товщини зрізувального шару при швидкісному зубофрезеруванні на основі основоположних теорій трибо техніки, технології машинобудування та теорії різання при формуванні поверхневого шару. Таким чином запропоновано науково обґрунтований підхід у формуванні необхідного радіуса округлення ріжучої кромки надтвердих змінних ріжучих пластин заданих параметрів та науково обґрунтованих режимів різання з забезпеченням найбільшої продуктивності і якості обробки загартованих зубчастих коліс.

Розроблено, створено та впроваджено інноваційні технології виготовлення крупногабаритних редукторів для виробів важкого машинобудування, що дозволило забезпечити імпортозаміщення, а також створити важке обладнання нового покоління (прокатні стани, поворотні платформи важких екскаваторів, рудорозмельні млини, важкі верстати тощо) енергетичної, гірничої та оборонної галузей промисловості.

Вперше в світовій практиці розроблено новий вид зубчастих зацеплень редукторів з гідродинамічними карманами і гарантованим рідинним змащуванням зони контакту з використанням пружно нестисливої рідини та некротним зацепленням зубчастих коліс. Розроблені інноваційні технології можуть використовуватись в оборонній промисловості при виготовленні приводів важкої броньованої техніки з забезпеченням роботи на форсованих режимах.

Список литературы

1. Специальные технологии 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.

2. Шелковой А. Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства / А. Шелковой, А. Клочко, Е. Набока // – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 с.: ил. На русском языке. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN: 9783659691720.
3. Добротворский С.С. Перспективы применения передовых технологий в зубообработке конических колес с круговыми зубьями / С.С. Добротворский, А.А. Клочко, Е.В. Басова и др. // Автоматизированные технологии и производства. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2016. – №2 (12) – С. 10-14
4. Рябенко С.В. Обработка шлифованием зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ / С.В. Рябенко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Житомир : ЖДТУ, 2013. – Вип. 14. – С. 145–154.
5. Клочко А.А. Применение высокоскоростных тяжело нагруженных зубчатых цилиндрических передач / А.А.Клочко // Научный Вестник ДГМА. – 2014. – № 2 (14Е). – С. 42–55. Режим доступа [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№2\(14E\)_2014/nomer_2\(14E\)_2014.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№2(14E)_2014/nomer_2(14E)_2014.html)
6. Исследование гидродинамических свойств высокоскоростных тяжело нагруженных зубчатых цилиндрических передач тяжелых токарных станков / В. Д. Ковалев., А. А. Клочко, Д. А. Кравченко, Е. Н. Киреев // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 79–93.
7. Логико-лінгвістичне моделювання взаємозв'язку функціональних характеристик системи дрібносерійного виробництва з параметрами процесу складання / О.М. Шелковий, О.О. Клочко, Л.Б. Шрон, А.О. Скоркін, О.Л. Кондратюк // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. – Вып.67. – С. 94-100.

References (transliterated)

1. . Timofeev Yu. V., Shapovalov VF, Klochko AA [et al.] Special technologies for gear-cutting of coarse-grained hardened wheels: monograph. - Kramatorsk: DGMA, 2011. 28 p. ISBN 978-966-379-524-9.
2. . Shelkova A., Klochko A., Naboka E. Simulation modeling in the problems of mehanoscopic production - Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 528 p. : ill. In Russian. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN: 9783659691720.
3. Dobrotvorskyy S.S., Klochko A.A. Basova E.V., ets. Perspektivy primeneniya peredovykh tehnologiy v zuboobrabotke konicheskikh koles s krugovymi zubyami [Prospects for the use of high-end technologies in the processing of bevel gears with circular teeth] Matematicheskoe modelirovanie i programnoe obespechenie proizvodstvennykh protsessov. Magnitogorsk. 2016. No2(12). Pp 10-14.
4. Ryabchenko S.V. Grinding treatment of cogwheels with disk circles from STM. Processes of mechanical parts in machine-building machines: zb. Sciences. Prac. - Zhitomir: ZHDTU, 2013. - Vip. 14. - pp. 145-154.
5. AA Klochko Application of high-speed heavy-duty gear-type cylindrical gears. Scientific Bulletin of the DSEA. - 2014. - No. 2 (14E). - pp. 42-55. The access mode is [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№2\(14E\)_2014/nomer_2\(14E\)_2014.html](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№2(14E)_2014/nomer_2(14E)_2014.html)
6. Kovalev VD, Klochko AA, Kravchenko D. A., Kireev E.N. Investigation of hydrodynamic properties of high-speed heavy-duty gear cylindrical gears of heavy lathes. Instrument reliability and optimization of technological systems: Sat. Sci. Tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Issue. 31. - pp. 79-93.
7. SilkWood, Klochko O.O., Shron LB, Skorkin, A.O. Kondratyuko O.L. Logico-lingvistichnee modulyuvannya vzaimozv'yazku funktsionalnykh charakteristik of the system of the other-virus vibrobnytsva with the parameters of the storage process. Open information and computer integrated technologies: Sat. Sci. Tr. - H.: Nats. Aerospace. Univ., "KhAI", 2015. - Issue 67. - pp. 94-100.

Поступила (received) 26.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Технологічні напрямки щодо забезпечення якісного виготовлення крупноабарітних редукторів / В.Д. Ковальов, Я.В. Васильченко, В.С. Антонюк, О.І. Волошин, С.В. Рябченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 19–30. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Технологические направления по обеспечению качественного изготовления крупноабаритных редукторов / В.Д. Ковалев, Я.В. Васильченко, В.С. Антонюк, А.И. Волошин, С.В. Рябченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 19–30. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Technological directions for providing high-quality production of large-size reducers / V. Kovalev, Ya. Vasilchenko, V. Antonyuk, A. Voloshin, S. Ryabchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26(1248). – P. 19–30. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковальов Віктор Дмитрович – д.т.н, проф. ректор Донбаської державної машинобудівної академії, Краматорськ.

Ковалев Виктор Дмитриевич – д.т.н, проф. ректор Донбасской государственной машиностроительной академии, Краматорск.

Kovalev Viktor Dmitrievich - Doctor of Technical Sciences, prof. Rector of the Donbass State Machine-Building Academy, Kramatorsk.

Васильченко Яна Василівна – д.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології Донбаської державної машинобудівної академії, Краматорськ.

Васильченко Яна Василевна – д.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедри комп'ютеризированных мехатронных систем, инструмент и технологии Донбасской государственной машиностроительной академии, Краматорск.

Vasilchenko Yana Vasilevna - doctor of technical sciences, associate professor, acting. Head of the Department of Computerized Mechanized Systems, Instrument and Technology of the Donbass State Machine-Building Academy, Kramatorsk.

Антонюк Віктор Степанович – д.т.н, проф. кафедри виробництва приладів, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ.

Антонюк Виктор Степанович - д.т.н., проф. кафедры производства приборов, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев.

Antonyuk Victor Stepanovich - doctor of technical sciences, prof. Department of Instrument Manufacturing, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kyiv.

Волошин Олексій Іванович – головний інженер, Приватне акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод», Краматорськ.

Волошин Алексей Иванович - главный инженер, Частное акционерное общество «Новокраматорский машиностроительный завод», Краматорск.

Voloshin Alexey Ivanovich - Chief Engineer, Private Joint-Stock Company "Novokramatorsk machine-building factory", Kramatorsk.

Рябченко Сергій Васильович – к.т.н., старший науковий співробітник відділу № 6, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ.

Рябченко Сергей Васильевич - к.т.н., старший научный сотрудник отдела № 6, Институт сверхтвердых материалов им. В.М. Бакуля НАН Украины, Киев.

Ryabchenko Sergey Vasilievich - Candidate of Technical Sciences, Senior Research Officer, Department number 6, Institute of Superhard Materials. VM Bakul NAS of Ukraine, Kiev.