

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЯЗАНЦЕВ АНТОН ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.791.927.55

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ВЕЛИКОМОДУЛЬНИХ
ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ ПОВЕРХНЕВИМ
ПЛАЗМОВО-ДУГОВИМ ЗМІЦНЕННЯМ**

05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кропивницький – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі технології машинобудування ДВНЗ «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Нечасєв Василь Павлович,
Державний вищий навчальний заклад
«Криворізький національний університет»,
доцент кафедри технології машинобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Саленко Олександр Федорович,
Кременчуцький національний університет
імені Михайла Остроградського,
професор кафедри галузевого машинобудування

кандидат технічних наук, доцент
Боков Віктор Михайлович,
Центральноукраїнський національний
технічний університет,
професор кафедри обробки металів тиском
та спецтехнологій

Захист відбудеться «02» березня 2018 р. о 13⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради К 23.073.02 у Центральноукраїнському національному технічному університеті за адресою: 25006, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Центральноукраїнського національного технічного університету, за адресою: 25006, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

Автореферат розісланий «01» лютого 2018 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради К 23.073.02
кандидат технічних наук, доцент



О.К. Дідик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У сучасному гірничозбагачувальному виробництві широко використовуються рудорозмельні млини, для подрібнення гірничої маси. Великомодульні зубчасті передачі є одними із найбільш навантажених і відповідальних елементів млина, це визначає надійність і довговічність обладнання в цілому. Ремонт і заміна великомодульних зубчастих передач гірничих машин вимагає виведення з експлуатації основного виробничого обладнання й зупинки технологічної лінії, що веде до значних втрат. Аналіз пошкоджуваності зубчастих коліс показує, що їх передчасний вихід з ладу обумовлений головним чином процесами руйнування в поверхневих шарах зубів.

Одним із найбільш перспективних напрямків розвитку сучасного виробництва є впровадження інтенсивних технологій поверхневого зміцнення великомодульних зубчастих передач з використанням концентрованих джерел енергії. Особливі переваги стосовно масивних деталей має поверхнєве плазмове-дугове зміцнення, завдяки високій тепловій потужності та можливості одержання зміцнених шарів значної товщини (до 5 мм). Проте, властивості зміцнених шарів після поверхневого плазмове-дугового зміцнення досліджені недостатньо, а також не запропоновані раціональні шляхи зручного регулювання питомої потужності в плямі нагріву плазмової дуги, як наслідок, немає можливості використати велику електричну потужність, необхідну для підвищення ефективності нагрівання. Відсутні науково обґрунтовані принципи вибору режимів і технологій зміцнення великомодульних зубчастих шестірень з урахуванням умов їх навантаження. Тому підвищення зносостійкості відкритих великомодульних зубчастих передач рудорозмельних млинів, шляхом поверхневого плазмове-дугового зміцнення, має важливе практичне значення і є актуальним науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконано в ДВНЗ «Криворізький національний університет», вони відповідають Державній науково-технічній програмі «Ресурс» (Постанова Кабінету Міністрів України від 8 жовтня 2004 р. №1331), Концепції науково-технологічного та інноваційного розвитку України (Постанова Верховної Ради України від 1999 р. №37), Загальнодержавній цільовій економічній програмі розвитку промисловості на період до 2017 року (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 9 липня 2008 р. №947-р). Робота виконана за програмою НДР «Розробка та впровадження нового способу плазмове зміцнення контактних поверхонь великомодульних зубчастих передач» (ДВНЗ КНУ, РКК №0116U001803, 2016р.).

Мета й задачі дослідження. Метою виконаних досліджень є підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих передач шляхом поверхневого плазмове-дугового зміцнення.

Сформульована мета роботи обумовила необхідність розв'язання таких задач:

- дослідження й визначення причин і характеру руйнувань зубчастих зачеплень приводів рудорозмельних млинів та обґрунтування можливості підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих передач шляхом плазмове-дугового зміцнення робочих поверхонь зубів;

- розробка методики дослідження механізмів структурних перетворень у сталях при поверхневій плазмово-дуговій обробці з метою вибору оптимальних режимів зміцнення великомодульних зубчастих передач, для одержання необхідної структури, фазового складу й твердості поверхневого шару;
- дослідження впливу технологічних параметрів ППДЗ на зносостійкість і механізми зношування поверхневого шару та розробка методики визначення й оцінки ресурсу великомодульних зубчастих передач після ППДЗ;
- оптимізація технологічних параметрів режиму поверхневого плазмово-дугового зміцнення шляхом математичного моделювання з метою виявлення їх впливу на відносний термін експлуатації великомодульних зубчастих;
- експериментальні дослідження процесу поверхневого плазмово-дугового зміцнення, розробка та реалізація методики теплофізичних досліджень;
- експериментальне дослідження довговічності зубчастих передач, які пройшли ППДЗ і їх розрахунки на довговічність за параметром зношення;
- розробка й створення комплексу оригінального спеціалізованого обладнання для реалізації технологічної схеми плазмово-дугового поверхневого зміцнення робочих поверхонь великомодульних зубчастих передач.

Об'єкт дослідження – процеси поверхневого зміцнення деталей.

Предмет дослідження – процеси поверхневого плазмово-дугового зміцнення великомодульних зубчастих передач.

Методи дослідження. У роботі використаний комплексний метод випробовувань, що включає аналітичний аналіз, наукове узагальнення попередніх досліджень математичне моделювання та експериментальні дослідження. Основні теоретичні результати отримані з використанням підходів, що базуються на класичних розрахунках деталей машин, теорії механізмів та машин, трибології та триботехніки, теорії зносу та надійності великомодульних зубчастих передач. Дослідження й визначення раціональних параметрів нагрівання при ППДЗ виконано в умовах та на базі підприємства АТ ««КОРУМ» КЗГО», а металографічні дослідження, експериментальне визначення довговічності та випробовування на абразивну зносостійкість зубчастих коліс, що пройшли ППДЗ - в лабораторних умовах на стендах. Для оптимізації параметрів ППДЗ за економічним критерієм застосовувалось математичне моделювання, організовано активний експеримент шляхом використання послідовного симплекс-методу, для вивчення області оптимуму поверхні відгуку була використана нелінійна стохастична модель.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Вперше встановлена закономірність формування загартованого шару при поверхневому плазмово-дуговому зміцненні великомодульних зубчастих коліс. Показано, що при швидкісному нагріванні без оплавлення плазмовою дугою прямої дії, яка сканує в змінному магнітному полі, швидкість охолодження поверхневих шарів досягає швидкості гартування, що забезпечує структурні перетворення в металі та формує зміцнений поверхневий робочий шар (межа міцності σ_b та твердість HRC зростають). Це забезпечує високі експлуатаційні характеристики поверхневого робочого шару: зносостійкість зубчастих передач підвищується в 2,28 рази.

2. Вперше сформульовано критерії придатності плазмової дуги для поверхневого плазмово-дугового зміцнення: плазмова дуга має рухатись зі швидкістю, що пе-

ревищує швидкість поширення тепла в матеріалі оброблюваної деталі, а її поверхнева ефективна питома потужність не повинна перевищувати 10^8 Вт/м². Це вимагає застосування плазмової дуги, що сканує за рахунок накладення на потік генерованої плазми зовнішнього магнітного поля.

3. Вперше встановлено аналітичний зв'язок та виявлено вплив параметрів режиму поверхневого плазмово-дугового зміцнення (сили струму I та швидкості переміщення джерела нагрівання V_d) на відносний термін експлуатації великомодульних зубчастих коліс x . Це дозволило отримати оптимальні співвідношення параметрів процесу, які забезпечують найкращі показники, щодо зносостійкості робочих поверхонь великомодульних зубчастих передач.

Практичне значення одержаних результатів.

На підставі дисертаційної роботи:

- проведені дослідження структури та експлуатаційних властивостей зміцнених поверхневих шарів, розроблені основні вимоги і принципи вибору оптимальних технологічних параметрів ППДЗ для підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих коліс у залежності від умов їх експлуатації;
- запропоновано та створено оригінальну конструкцію магнітно-відхиляючої системи для створення зовнішнього магнітного поля з метою зменшення локальності нагріву плазмового джерела;
- розроблено промисловий стенд для реалізації технології ППДЗ великомодульних зубчастих передач за патентом на корисну модель №103171; від 10.12.15 «Спосіб термічної обробки крупномодульних зубчастих коліс»;
- розроблено дослідний зразок установки для випробовувань на зносостійкість зубчастих коліс із зміцненим поверхневим шаром;
- розроблено та створено оригінальний пристрій для здійснення конденсаторного зварювання, який було використано для приварювання термопар з метою дослідження теплових полів при ППДЗ;

Основні наукові положення дисертаційної роботи та розроблені технологічні процеси знайшли дослідно-промислове застосування та впроваджені у виробничий процес зазначеного способу на підприємствах: ТОВ «Бізнес – Трейд плюс» (від 18.04.2016 р.), АТ ««КОРУМ» КЗГО» (від 27.05.2016), що засвідчено відповідними актами. Результати досліджень впроваджені та використовуються в навчальному процесі ДВНЗ «Криворізький національний університет» (від 22.08.2017 р.) при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальностями «Технології машинобудування», «Металорізальні верстати та системи», «Прикладна механіка», «Інженерна механіка». Розрахований очікуваний економічний ефект становить 342650 грн на рік.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації отримані автором самостійно. Збір статистичних даних виконувався автором сумісно з фахівцями гірничозбагачувальних комбінатів Кривого Рогу. У друкованих роботах, опублікованих у співавторстві, особисто здобувачеві належить: [1] – огляд і аналіз літературних джерел, розроблення способу різання з плазмовим нагрівом; [2] – встановлення та формулювання вимог до джерела плазмового нагріву; [3] – обґрунтування застосування методу ППДЗ для підвищення експлуатаційних показників деталей гірничих машин; [4, 8] – розроблення нового способу ППЗ

робочих поверхонь великомодульних зубчатих коліс; [6] – обробка та аналіз експериментальних даних, встановлення залежностей швидкості зношення від величини зносу зубів, розробка та удосконалення способу ППЗ зубчатих передач; [7] – аналіз можливості використання низькотемпературної плазми для впровадження в процес термічної обробки великогабаритних деталей; [10, 12] – розробка науково обґрунтованих критеріїв граничного та допустимого станів зубчатих передач після плазмового зміцнення; [16] – розробка способу термічної обробки великомодульних зубчастих коліс плазмовою дугою.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, висновки та результати досліджень було обговорено на наукових семінарах кафедри технології машинобудування ДВНЗ «Криворізький національний університет» (2011–2016 рр.), науково-технічних конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості» (м. Кривий Ріг, 2011 р.), 14-та Науково – практична конференція «Технологии упрочнения нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» (м. Санкт-Петербург, 17-20 квітня 2012 р.); Всеросійська конференція-семінар «Научно-техническое творчество: проблемы и перспективы» (м. Сызрань, 2013 р.), Міжнародна науково-практична конференція студентів і молодих учених «Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны» (м. Пенза, 2013 р.), Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених «Проблеми енергозбереження та механізації в гірничо-металургійному комплексі» (м. Кривий Ріг, 2014р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Сталий розвиток промисловості та суспільства» (м. Кривий Ріг, 2013, 2015 рр.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 16 наукових робіт, із них 5 – у спеціалізованих наукових виданнях, рекомендованих МОН України для публікування результатів дисертаційних робіт, 1 – у наукових виданнях, які входять до науко-метричної бази Scopus. Серед інших публікацій 9 – у збірниках матеріалів і тез доповідей на наукових конференціях. Пріоритет основних наукових і технічних рішень, які реалізують запропонований в дисертації спосіб плазмового зміцнення робочих поверхонь великомодульних зубчатих коліс, захищений 1 патентом України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертація містить вступ, п'ять розділів, загальні висновки, список використаних джерел зі 140 найменувань та 9 додатків. Основний текст дисертації викладений на 147 сторінках, повний обсяг дисертації становить 207 сторінок, включаючи 54 рисунки та 14 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету, об'єкт, предмет та задачі наукових досліджень, зазначено ступінь наукової новизни одержаних результатів, розкрито їх практичну значущість. Наведено результати реалізації та апробації результатів досліджень.

У першому розділі проведено аналіз сучасних підходів до поверхневого зміцнення концентрованими джерелами енергії (КДЕ) великомодульних зубчастих коліс. Розглянуті причини та характер руйнувань великомодульних зубчастих

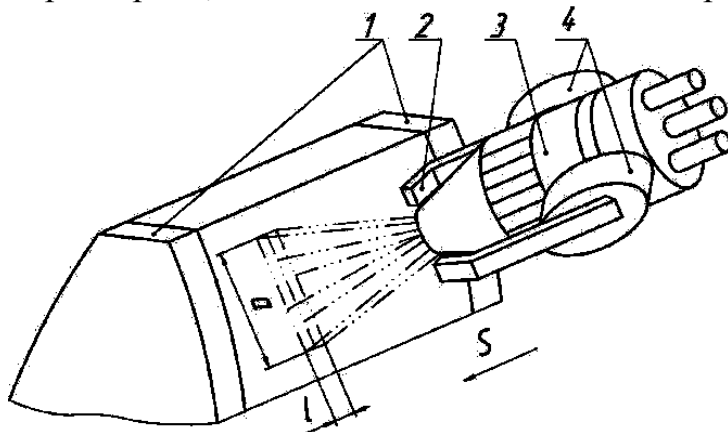
зачеплень приводів рудорозмельних млинів, види ушкоджень елементів редукторів у практиці експлуатації на гірничозбагачувальних комбінатах регіону.

Зроблено огляд сучасних методів і технологій підвищення надійності трансмісій гірничих машин. Зазначено, що значний внесок до вирішення проблеми підвищення працездатності зубчастих передач конструкторськими, технологічними й експлуатаційними заходами присвячено безліч досліджень, що були проведені А.І. Беляєвим, М.М. Каменєвим, В.М. Кудрявцевим, М.М. Малишевим, В.В. Орловим, О.І. Петрусевичем, Е.В. Рижовим, Н.Ф. Хлебаленим, Д.Л. Юдіним, І.О. Болотовським, В.А. Гавриленко, В.К. Кудрявцевим, І.В. Крагельський.

Перспективним напрямком підвищення зносостійкості робочих поверхонь зубів великомодульних зубчастих коліс є зміцнювальна термічна обробка робочої поверхні концентрованим потоком енергії, а саме плазмовим струменем. Питання досліджень та розробок технологій плазмового зміцнення висвітлені в роботах Лещинського Л.К., Токмакова В.П., Григор'янца А.Г., Крапошина В.С., Анякіна М.І., Бердникова А.А., Самотугіна С.С., Рахімянова Х.М. та інших. Однак тут необхідно враховувати, що технології поверхневого зміцнення мають свої специфічні особливості і їх результативність залежить від врахування різноманітних факторів, що відображують як саму деталь, її хімічний склад, габарити, геометричну форму, вихідний стан поверхні, так і умови експлуатації. Проведений аналіз показує перспективи плазмового нагрівання, але немає відомостей і розробок, які можна застосувати до великомодульних зубчастих передач.

За результатами вивчення та аналізу руйнувань великомодульних зубчастих передач та технології поверхневого плазмово-дугового зміцнення сформульовано підхід до аналізу та завдання дослідження.

У другому розділі наведено та розглянуто обладнання й методики виконання експериментальних робіт по поверхневому плазмово-дуговому зміцненню (ППДЗ). Сформульовані критерії, яким повинно задовольняти джерело плазмового нагрівання, а саме: 1 – можливість регулювання ширини нагрівання; 2 – відсутність оплавлення поверхневого шару; 3 – забезпечення рівномірної глибини структурних перетворень; 4 – досягнення необхідної мікроструктури зміцненого шару.



1 – накладки; 2 – наконечники магнітно-відхиляючої системи; 3 – електромагнітні котушки; 4 – плазмотрон прямої дії

а)



б)

Рис. 1. Схема пристрою (а) та експериментальна установка (б) для ППДЗ

З урахуванням викладених вимог був використаний однодуговий плазмотрон постійного струму ПВР-402М, а в якості плазмоутворювального середовища – стиснене повітря. Зниження локальності нагрівання здійснюється за рахунок накладення на потік генерованої плазми зовнішнього змінного магнітного поля, для створення якого плазмотрон оснащують спеціальною магнітною системою (рис. 1).

Розроблена методика підготовки зразків і досліджень фазового складу й структури зміцненого шару. Для дослідження динаміки зміни температурного поля в матеріалі заготовки при нагріванні плазмовою дугою, що сканує були проведені експерименти за допомогою штучних термопар, приварених конденсаторним зварюванням до дна отворів Ø1,6мм, просвердлених із зворотної сторони заготовки.

Для оцінки й прогнозування працездатності великомодульних зубчастих коліс із зміцненим поверхневим шаром, що експлуатуються в умовах ударно-абразивного зношування, виконано необхідні комплексні дослідження й випробування абразивної зносостійкості. Для виміру величини зношування був обраний метод порівняння профілю й товщини зуба до та після зношування. У відсотковому відношенні поточне значення зношування зубів визначається виразом:

$$\Delta S = \left(1 - \frac{S_n}{S_0}\right) \cdot 100, \%$$
 Тут S_0 – товщина зуба до експлуатації; S_n – товщина зуба після зношування за час T .

Якщо зносостійкість матеріалу зубчастого колеса не забезпечує заданого ресурсу, вираженого в одиницях шляху тертя $[L]$, то необхідна товщина зміцненого шару (a) визначається виразом:
$$a = \frac{\beta \cdot I_{hf}[L] - [\Delta S]}{\beta - 1}, \quad \beta = I_{hm} / I_{hf}.$$

Таким чином, знаючи інтенсивність зношування матеріалу (I_{hm}) та зміцненого шару (I_{hf}), граничне зношування $[\Delta S]$ і термін служби $[L]$, можна знайти товщину зміцненого шару. Очевидно, отримання поверхневого зміцненого шару деякої товщини приводить до збільшення шляху тертя (ресурсу) при фіксованому значенні граничного зношування $[\Delta S]$.

У третьому розділі проведено теоретичне дослідження впливу теплових процесів при плазмовій обробці великомодульних зубчастих передач на їх експлуатаційні показники.

Розглянуті концептуальні положення теплофізики поверхневого зміцнення металів і сплавів концентрованими джерелами енергії (КДЕ). Встановлено, що в результаті впливу КДЕ поверхневі шари виробів піддаються швидкісному нагріванню до високих температур, охолоджуються й у них реалізуються фазові, структурні та субструктурні перетворення.

Максимальна температура T на поверхні тіла пов'язана з питомою потужністю q_2 джерела тепла й розміром l у напрямку його руху зі швидкістю V , та оскільки l/V - час дії теплового джерела τ на плямі нагрівання, то справедливе співвідношення:

$$T = \frac{q_2 \cdot \sqrt{\omega}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\tau}, \quad (1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу; ω – коефіцієнт температуропровідності матеріалу.

Ввівши обмеження $T \leq T_{\Pi}$, яке випливає з умови нагрівання поверхневого шару матеріалу без оплавлення, виразивши питому потужність q_2 через інші параметри, одержимо:

$$q_2 = \frac{T_{\Pi} \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{\omega \cdot \tau}}. \quad (2)$$

Продиференціювавши (1) за часом одержимо вираз, за допомогою якого можна оцінити порядок величини швидкостей нагрівання V_H на поверхні виробу, відповідних до зазначеного інтервалу питомих потужностей:

$$V_H = \frac{dT}{d\tau} = \frac{q_2 \cdot \sqrt{\omega}}{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi \cdot \tau}}. \quad (3)$$

Розрахунки за формулою (3) показують, що швидкість нагрівання для $q_2 = 10^7, 10^8, 10^9$ Вт/м² становить приблизно 50; $50 \cdot 10^2$ і $50 \cdot 10^4$ град/с і це добре узгодиться з наявною інформацією про оптимальні швидкості нагрівання джерелами КДЕ, із зазначеними рівнями питомої потужності.

Встановлено, що в порівнянні з іншими джерелами КДЕ плазмова дуга, що сканує має ряд додаткових переваг: простота та відносно низька вартість обладнання для реалізації; високий ККД нагрівання (до 40%); можливість використання повної електричної потужності дуги для підвищення продуктивності.

Проведено теоретичне обґрунтування можливості збільшення залишкового ресурсу зубчастих коліс за допомогою впливу на їх поверхневу твердість. Установлено, що в міру зношування зуба, небезпечний переріз переміщається від ніжки зуба до його головки. Значне зниження зношування буде відбуватися при впливі на фізико-механічні властивості матеріалів з яких виготовлені зубчасті передачі, а саме збільшенні твердості контактних поверхонь зубів.

Вперше на основі методів статистичної механіки й теорії ймовірностей побудована модель абразивного зношування поверхонь пар тертя, зокрема важконавантажених зубчастих передач. Аналіз і оцінка абразивного зношування зубів, проводяться залежно від характеристики абразивного впливу A , фізико-механічних властивостей матеріалів $M_{1(2)}$, геометричних і кінематичних параметрів спряжень K . Зношування за одне навантаження в мм:

$$\begin{aligned} U_{1(2)} &= 6,8 \frac{AK}{M_{1(2)}}; \\ A &= q_a^{2/3} R^{0.5} \sigma^{2.5}; \\ M_{1(2)} &= \delta_{1(2)}^t HB_{1(2)}^{1.5} HB_{2(1)}; \\ K &= \sqrt{\rho_{np}} \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2}, \end{aligned} \quad (4)$$

де q_a – концентрація абразивних домішок у змащенні або повітрі, %; R – їх середній радіус, мм; σ – межа міцності, МПа; $\delta_{1(2)}$ – характеристика пластичності поверхні – відносне подовження при розриві; t – коефіцієнт контактно-фрикційної втоми;

$\rho_{np} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$ – наведений радіус кривизни поверхонь, що сполучаються (ρ_1, ρ_2 – радіуси кривизни зубів у точці контакту), мм; V_1, V_2 – швидкості ковзання поверхонь, що сполучаються, м/с.

Грунтуючись на аналітичних залежностях абразивного зношування, поряд з експериментальними, виконані теоретичні дослідження розподілу зношування по профілю зуба і його впливу на основні параметри зацеплення.

Проведено оптимізацію параметрів плазмового зміцнення для досягнення оптимального строку терміну зубчастої передачі за економічними показниками.

У якості критерію оптимізації виступають сумарні середні річні втрати, пов'язані з експлуатацією, ремонтом і урахуванням вартості зубчастих коліс

$$\hat{C} = \frac{k}{x} \hat{C}_0 + x^{n-1}; \quad \left(x = \frac{T}{T_0}\right), \quad (5)$$

де $\hat{C} = \frac{C}{C_B}$; $\hat{C}_0 = \frac{C_0}{C_B}$; C_0 – середні річні втрати внаслідок ремонтних простоїв і оплатою на відновлення функціонування, грн; C_B – вартість зубчастого колеса, виготовленого з базового матеріалу, грн; k – середня кількість відмов у роботі зубчастих коліс, рік⁻¹; T_0 – середній строк експлуатації зубчастого колеса, виготовленого з базового матеріалу, рік; T – середній строк експлуатації зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ, рік; n – показник, що характеризує збільшення вартості зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ ($n > 1$).

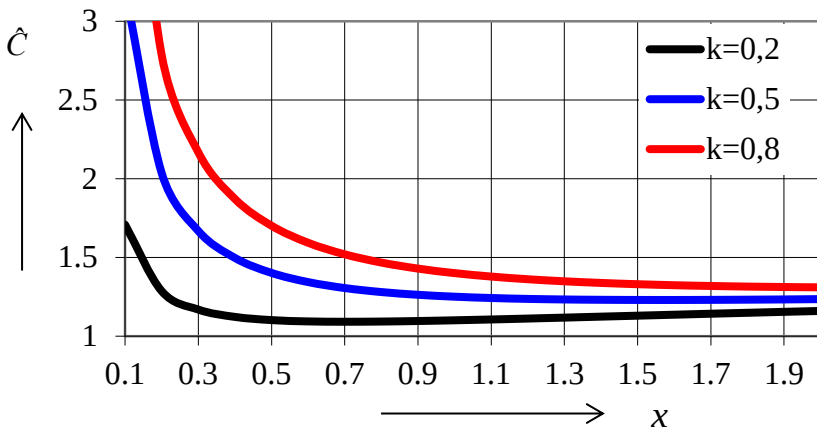


Рис. 2. Залежність відносних сумарних річних втрат від відносного строку експлуатації зубчастих коліс, що пройшли ППДЗ ($\hat{C}_0 = 0,5$, $n = 1,15$)

Розв'язок завдання оптимізації параметрів процесу ППДЗ зубчастих коліс зводиться до мінімізації функції (5).

$$x_0 = \sqrt[n]{\frac{k\hat{C}_0}{n-1}}. \quad (6)$$

Стаціонарна точка (6) є точкою мінімуму функції (5). Мінімальне значення функції (5) знаходиться шляхом підстановки значення (6), отримуємо

$$\hat{C}_{\min} = k \cdot n \cdot \left(\frac{\hat{C}_0}{n-1}\right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (7)$$

Аналіз графіків розрахованих за виразом 5, наведених на рис. 2, показує, що існує оптимальний час експлуатації зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ. Крім того, при збільшенні відносного числа відмов у роботі зубчастого колеса зростають, як відносні сумарні річні втрати, так і оптимальний строк експлуатації зубчастих коліс, що пройшли ППДЗ. А аналіз графіків, розрахованих за формулою (7) та наведених на рис. 3, показує, що залежність мінімальних відносних середніх річних втрат від показника, що характеризує ріст вартості зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ, носить екстремальний характер.

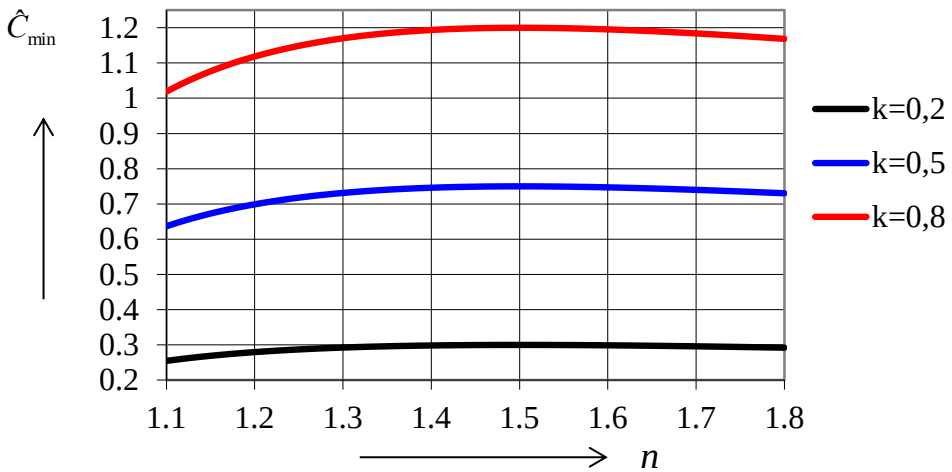


Рис. 3. Залежність мінімальних відносних середніх річних втрат від показника, що характеризує ріст вартості зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ ($\hat{C}_0 = 0,5$)

При розв'язку поставленого завдання оптимізації проводився експериментальний пошук області оптимуму шляхом варіювання двома факторами – V і I . Для пошуку області оптимуму шляхом мінімізації нев'язки рівняння $\sqrt[n]{\frac{k\hat{C}_0}{n-1}} = \varphi(V; I)$ застосовувався симплекс-метод. При розв'язку завдання на площині симплексом є трикутник. Для розв'язку завдання були обрані параметри $n=1,15$, $k=0,5$, $\hat{C}_0=0,5$. Тоді:

$$x_{opt} = \sqrt[1,15]{\frac{0,5 \cdot 0,5}{1,15 - 1}} = 1,56. \quad (8)$$

За допомогою симплекс-трикутника було визначено в межах обраних інтервалів варіювання оптимальну область, яка відповідає режиму обробки з $V=393$ мм/хв, і $I=250$ А.

Для вивчення області оптимуму поверхні відгуку була використана нелінійна стохастична модель, описувана поліномом другого порядку. Застосування композиційного ротатбельного планування експерименту дало можливість синтезувати математичну модель.

Попередні дослідження показали, що для побудови математичної моделі з метою знаходження оптимуму розв'язуваного завдання доцільно застосувати центральне композиційне ротатбельне планування другого порядку. У цьому випадку математична модель має вигляд:

$$\hat{x} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_1^2 + a_4 X_2^2 + a_5 X_1 X_2, \quad (9)$$

де $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ – коефіцієнти рівняння регресії.

Наступний статистичний аналіз результатів моделювання дозволив на основі критерію Стюдента відсіяти незначущі коефіцієнти математичної моделі, а також установити її адекватність шляхом застосування критерію Фішера. Після чого рівняння регресії отримало наступний вигляд:

$$\hat{x} = 1,103 - 0,065 X_1 + 0,39 X_2 + 0,036 X_2^2. \quad (10)$$

Згідно з рівнянням регресії (10), ізолінії задаються рівняннями

$$0,036 X_2^2 - 0,065 X_1 + 0,39 X_2 = C_k - 1,103; \quad (k=1;2;\dots), \quad (11)$$

де C_k – параметр, який визначає розташування ізоліній.

Беручи до уваги, що в рівняння (11) тільки один фактор входить у другій ступені, можна зробити висновок, що ізолінія є параболою. Вершина параболі перебуває в точці $M_0 (0,723 - 15,385 \cdot C_k; -5,417)$.

Аналіз ізоліній, наведених на рис.4, показує, що ці ізолінії є параболою. При збільшенні параметра x (рівного C_k) відбувається зсув вершини параболі вліво вздовж осі X_1 . Необхідно підкреслити, що через область, у якій будувалась математична модель, проходить тільки верхня гілка параболі.

Аналіз розв'язку, представленого у вигляді точок, розташованих на оптимальній ізолінії, між точками $M_0 (-1; 0,925)$ й $M_1 (0,468; 1)$, дозволяє зробити висновок про існування безлічі оптимальних розв'язків. Безліч розв'язків може бути записано у вигляді лінійної комбінації координат кінців цього відрізка прямої, тобто

$$\begin{cases} X_1 = -1 + 1,468 \cdot t \\ X_2 = 0,925 + 0,075 \cdot t \end{cases} \quad (0 \leq t \leq 1). \quad (12)$$

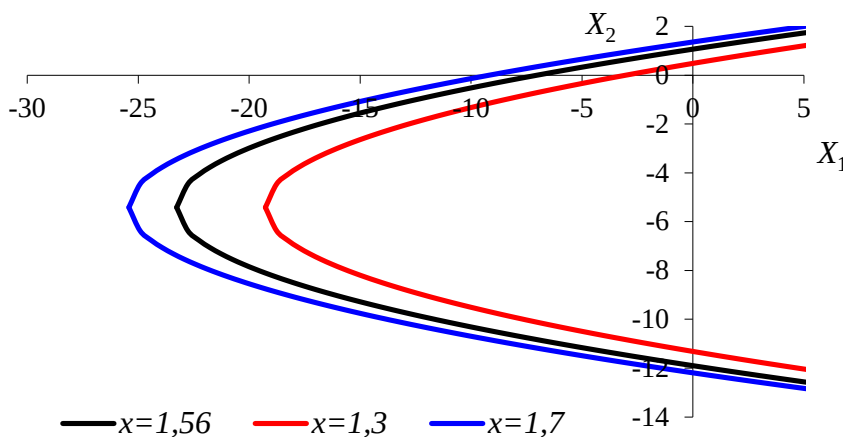


Рис. 4. Ізолінії поверхні відгуку

Зроблено перехід та знайдено оптимальні розв'язки в дійсних одиницях:

$$\begin{cases} V = 350 + 73,4 \cdot t \\ I = 246,25 + 3,75 \cdot t \end{cases} \quad (0 \leq t \leq 1). \quad (13)$$

Для знаходження єдиного оптимального розв'язку був запропонований економічний критерій, що визначає сумарні витрати, пов'язані з величинами швидкості руху джерела нагрівання й сили струму плазмової дуги. Мінімізація цього критерію в границях оптимальної ізолінії дала можливість визначити найкращі величини швидкості руху джерела нагрівання й сили струму плазмової дуги для забезпечення оптимального строку експлуатації зубчастого колеса, поверхня якого піддана ППДЗ. Оптимальне завдання:

$$L = c_1 \cdot V + c_2 \cdot I \rightarrow \min_{V,I}, \quad (14)$$

де c, c_1 — питомі витрати, пов'язані зі застосуванням для реалізації процесу ППДЗ переміщення джерела нагрівання й струму плазмової дуги, відповідно.

$$t=0, \begin{cases} V_0 = 350 \\ I_0 = 246,25 \end{cases}; \quad \underline{L_0 = c_1 \cdot 350 + 246,25}; \quad t=1; \begin{cases} V_1 = 423,4 \\ I_1 = 250 \end{cases}; \quad \underline{L_1 = c_1 \cdot 423,4 + 250}. \quad (15)$$

Аналіз графіків, наведених на рис. 5, показує, що мінімальні економічні втрати мають місце при $t = 0$, тобто на лівому кінці оптимальної ізолінії (13).

Таким чином, оптимальними значеннями факторів при проведенні процесу ППДЗ є $V_{opt} = 350$ мм/хв, $I_{opt} = 245$ А.

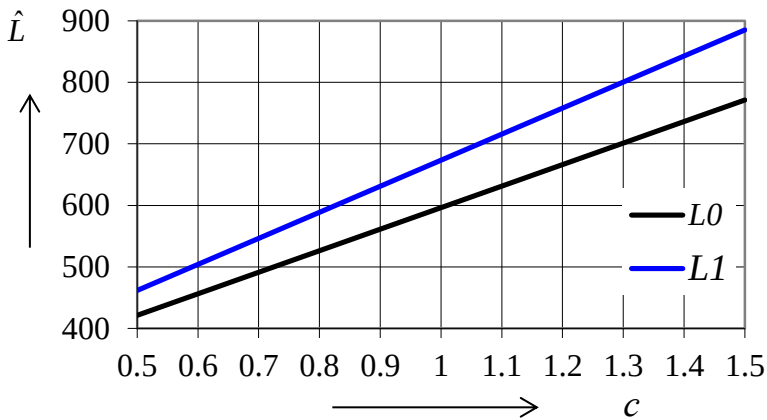


Рис. 5. Залежність мінімальних економічних втрат від відношення питомих вартостей

Отримані значення факторів визначають оптимальні величини швидкості переміщення джерела нагрівання й струму плазмової дуги, які забезпечують оптимальний строк експлуатації зубчастих коліс, підданих ППДЗ.

У четвертому розділі наведено результати проведення виробничих та лабораторних експериментальних досліджень процесу підвищення експлуатаційних характеристик великомодульних зубчастих передач шляхом ППДЗ.

Виробничі дослідження проведено на ПрАТ «Східний ГЗК», «Інгулецький ГЗК», «Центральний ГЗК», ТОВ «Бізнес – Трейд плюс», АТ ««КОРУМ» КЗГО» (м. Кривий Ріг) та їх результати підтверджують достовірність сформульованих теоретичних посилок.

Виконані експериментальні дослідження зношування зубів відкритих зубчастих передач рудорозмельних млинів. У результаті обробки та аналізу експериментальних даних отримані усереднені величини (рис. 6), що характеризують різні етапи зношування. Установлено, що граничне зношування шестірні обмежене періодом, що встановився та для досліджуваних передач становить 3÷4 мм із кожної поверхні зуба. Швидкість припрацювального зношування шестірні в середньому дорівнює $Vn_1 \approx 5V_1$ (V_1 – швидкість у період встановленого зношування шестірні), а його тривалість $t_0 \approx \Delta S_{10}/5V_1$.

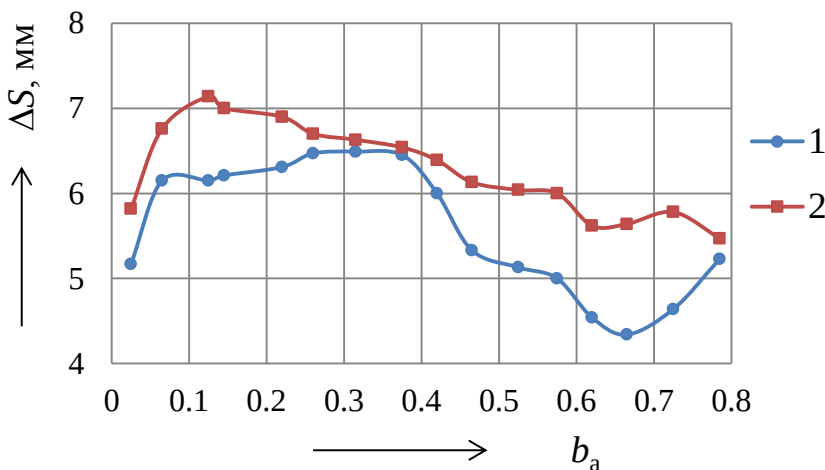


Рис. 6. Зношування профілю зубів ($m=20$) млинів МШЦ-4500х6000 по ширині
1 – величина зношування на відстані від вершини зуба 5 мм
2 – величина зношування на відстані від вершини зуба 20 мм

Аналіз і оцінку швидкості зношування відкритих зубчастих передач рудорозмельних млинів було зроблено за наступною формулою:

$$U_{1(2)} = 60N_{1(2)} Kn_{1(2)} c_2 L_{1(2)}, \quad (16)$$

де $N_{1(2)}$ – параметр, що характеризує абразивний вплив середовища й фізико-механічні властивості матеріалів зубів для даних умов експерименту; $n_{1(2)}$ – частота обертання, об/хв; c_2 – число зачеплень зубів вінця за один оберт; L – коефіцієнт, що враховує відмінність абразивного впливу середовища, фізико-механічних властивостей матеріалу й умов навантаження зубів для розрахункового випадку:

$$L = \frac{\xi}{K_{q_a}^{2/3} K_R^{0.5} K_{\sigma}^{2.5} \mu_{\delta_{1(2)}}^2 \mu_{HB_{1(2)}}^{1.5} \mu_{HB_{2(1)}}}; \quad (17)$$

$$K_{q_a} = \frac{q_{a_N}}{q_{a_P}}; K_R = \frac{R_N}{R_P}; K_{\sigma} = \frac{\sigma_N}{\sigma_P}; \mu_{\delta} = \frac{\delta_P}{\delta_N}; \mu_{HB_{1(2)}} = \frac{HB_{P(1)2}}{HB_{N(1)2}}.$$

На швидкість абразивного зношування впливає величина, що характеризує фізико-механічні властивості матеріалу зубчастих коліс $M = \delta' HB_{1(2)}^{1.5} HB_{2(1)}$. Величина σ – складена величина параметра, що характеризує абразивний вплив середовища. Розглядаючи вплив фізико-механічних властивостей матеріалів будемо враховувати, що швидкість зношування залежить від наступних величин

$$U_{1(2)} \approx \frac{\sigma^{2.5}}{\delta' HB_{1(2)}^{1.5} HB_{2(1)}} \quad (18)$$

Аналізуючи вираз (18) помітимо, що підвищення твердості активної поверхні навіть одного із зубчастих коліс призводить до зниження межі міцності абразивних часток і отже, швидкості зношування. Підвищення твердості активних поверхонь зубів відкритих зубчастих передач, крім того сприяє зниженню супутніх видів зношування, підвищенню їх контактної міцності.

Проведено аналітичний розрахунок температурного поля заготовки, що виникає від дії плазмової дуги. Для визначення температурного поля використовувався вираз, що описує процес поширення тепла від швидко рухомого джерела, що переміщається по поверхні тіла з нетеплопровідною границею:

$$\theta(x, y, z) = \frac{q}{2\pi\lambda(x - x_u)} \text{EXP} \left\{ -\frac{V[(y_u - y)^2 + Z^2]}{4\omega(x - x_u)} \right\}, \quad (19)$$

де $\theta(x, y, z)$ – елементарне підвищення температури, викликане в точці тіла з координатами x, y, z у рухомій системі; x_u, y_u – координати точкового джерела, що рухається разом із системою координат; λ, ω – коефіцієнти тепло- і температуропровідності матеріалу.

У результаті перетворень отримуємо:

$$\theta(x, y, z) = \frac{IU\eta}{\pi\ell_s\lambda} \int_0^{\Delta^*} \text{EXP} \left(-\frac{V\ell_s Z^2}{4\omega(x - x_u)} \right) \frac{dX_u}{X - X_u} \times \int_0^1 \text{EXP} \left[-\frac{V(Y_u - Y)^2}{4\omega\ell_s(X - X_u)} \right] dY_u, \quad (20)$$

$$\text{де } \Delta^* = \begin{cases} X & \text{при } 0 \leq x \leq l \\ l & \text{при } x \geq l \end{cases}.$$

За результатами розрахунків були побудовані картини теплових полів, що виникають у поверхневому шарі заготовки зі сталі 40Х и 45Г при плазмовому нагріванні поверхні заготовки вала-шестірні по всій висоті зуба (рис. 7).

Аналіз отриманих даних показує, що нагрівання поверхневого шару по всій висоті зуба забезпечує його рівномірний розподіл тепла. Причому найбільш ефективним нагрівання виявляється в тому випадку, коли температура поверхні

наближається до температури плавлення, але оплавлення ще не відбувається. У зв'язку із цим представляється дуже важливим призначити такі теплові режими, при яких відбувається більш повне використання можливостей плазмової дуги.

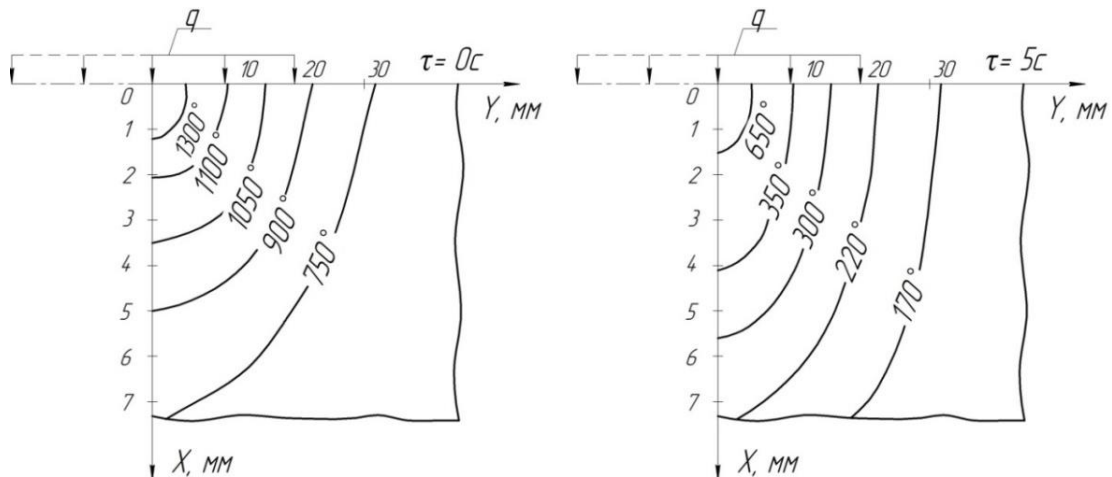


Рис. 7. Теоретичний розподіл температур при нагріванні лінійним джерелом ($V_d=400\text{мм/хв}$, $I=300\text{А}$, $U=120\text{В}$, $\eta=40\%$, $q=3,4\cdot 10^5\text{ Вт/м}^2$)

Виконано експериментальне дослідження тепловкладення при ППДЗ. Теплова потужність джерела нагрівання визначалася по формулі:

$$W = \frac{\Delta Q(C_g \times M_g + C_m \times M_m)}{\tau}, \quad (21)$$

де C_g – теплоємність гліцерину; C_m – теплоємність металу; τ – час нагрівання, хв.

ККД визначався з виразу:

$$\eta = \frac{W_{пл} - W_{хол}}{U \times I} \times 100\%, \quad (22)$$

де I – сила струму плазмової дуги; U – напруга в ланцюзі дуги; $W_{пл}$, $W_{хол}$ – значення теплової потужності, отримані в першій й другій серіях досліджень.

Розрахунки ККД проводився при різних значеннях температури попереднього підігріву зразка в печі. У результаті були отримані емпіричні залежності. Їх аналіз показує, що ККД нагрівання в прийнятому діапазоні швидкостей переміщення й потужності плазмової дуги можна приймати в цілому 40%.

Досліджено зміну фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу при плазмовому нагріванні при ППДЗ.

Матеріал заготовки, що був підданий плазмовому впливу, випробовує деформації й напруги, тут відбуваються структурно-фазові перетворення. На рис. 8 показаний зразок зі сталі 40Х, поверхня якого піддалася плазмовому нагріванню. На торцевій поверхні макрошліфа проглядається у вигляді рівномірної світлої смуги шар, що відрізняється по травленості від основного металу.



Рис. 8. Зразок підданий нагріванню скануючою плазмовою дугою

Аналіз експериментальних даних дозволив побудувати графік залежності глибини структурних перетворень від потужності джерела нагрівання й швидкості його переміщення (рис. 9) при постійних розмірах. У результаті нагрівання ($\theta > 500^\circ\text{C}$) шари металу, розташовані нижче аустенітної структури, отриманої в результаті плазмового нагрівання, зазнають високий відпуск. При цьому відбувається кілька процесів. Основний – розпад мартенситу, що полягає у виділенні вуглецю у вигляді карбідів, розпадається залишковий аустеніт, відбуваються карбідні перетворення й коагуляція карбідів, зменшуються недосконалості кристалічної будови L – твердої будови й залишкові напруги.

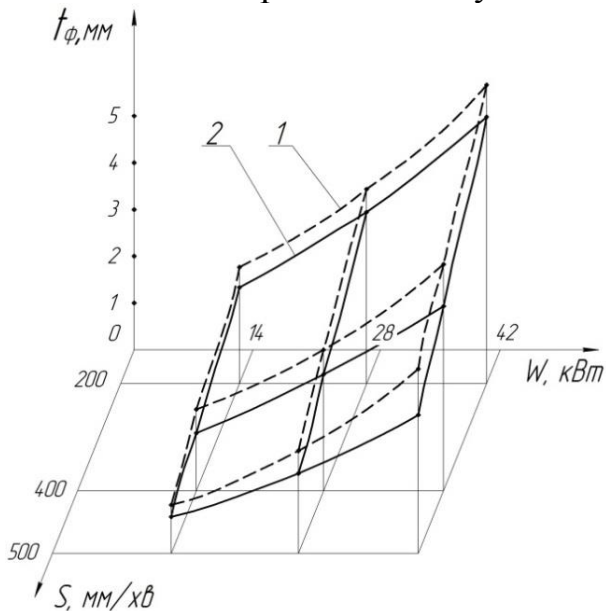
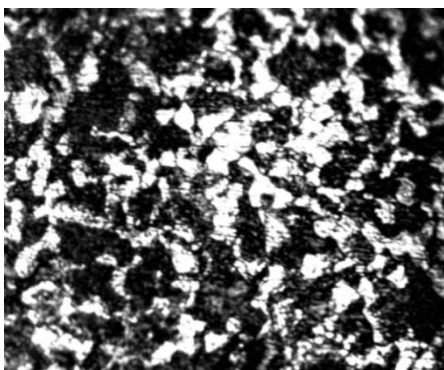
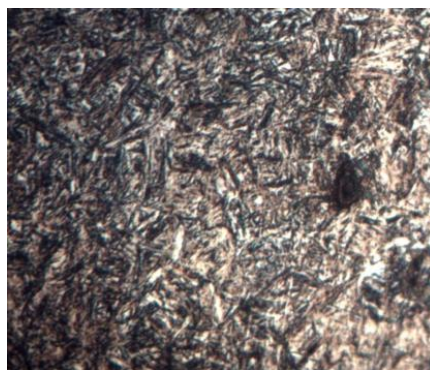


Рис. 9. Глибина зміцненого шару при нагріванні скануючою плазмовою дугою (сталь 40X): 1 – теоретична, 2 – експериментальна

З'ясовано, що при ППДЗ сталі 40X у всьому діапазоні швидкості відносного переміщення деталі й плазмотрона (100..630 мм/хв), при яких проводилися дослідження, утворюється мартенситний шар різної глибини, що відрізняється від основної структури. При цьому слід зазначити, що глибина описаних перетворень становить 30...70% від основної структури.



а)



б)

Рис. 10. Зміна структури матеріалу під впливом плазмового нагрівання, збільшення $1000\times$

а – вихідна структура,
б – після плазмового нагрівання

З підвищенням температури відпуску укрупнюються цементитні частки (рис. 10), що веде до збільшення пластичності матеріалу.

Отже, можна зробити висновок, що процес ППДЗ великомодульних зубчастих колі суттєво впливає на структурні перетворення в матеріалі деталі та значною мірою покращує властивості матеріалу, отримуючи поверхню з високою твердістю та пластичністю.

Розглянуто зміну твердості шарів припуску в процесі охолодження й дослідження якості обробленої поверхні після ППДЗ.

З метою вивчення властивостей середьноголегованих сталей (40X) у процесі охолодження, був зроблений вимір динамічної твердості, що полягає у впровадженні в досліджувану поверхню індентору, що володіє певним запасом кінетичної енергії. У результаті були отримані графіки зміни температури поверхні і її динамічної твердості (рис. 11). Аналіз графіків показав, що в процесі остигання відбувається зміцнення поверхневих шарів заготовки, нагрітих вище температури A_{c3} . причому різке збільшення твердості починається при охолодженні до температури 200...230°C. Це пов'язано з особливостями С – образних діаграм даної сталі.

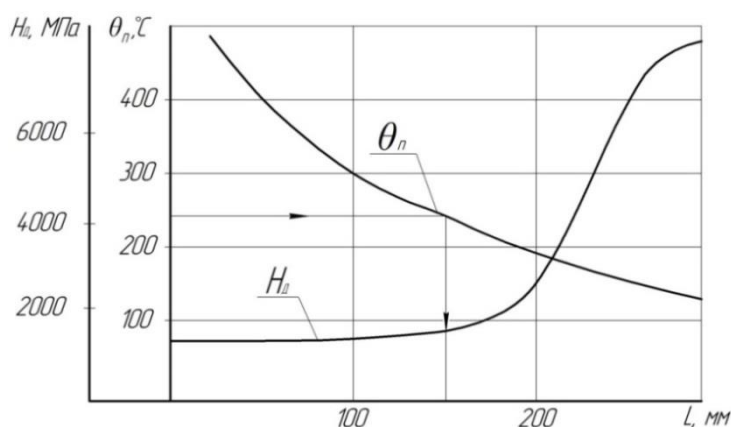


Рис. 11. Зміна температури й динамічної твердості в процесі охолодження після плазмового нагрівання (сталь 40X; $I = 250A$, $V_d = 300 \text{ мм/хв}$; $d_c = 6 \text{ мм}$; $Q_{\text{пов}} = 2,5 \text{ м}^3/\text{год}$)

Результати виміру мікротвердості представлено на (рис. 12). Із представлених графіків видно, що мікротвердість поверхневих шарів заготовки, обробленої на різних теплових режимах, на глибині 3...5 мм значно відрізняється по величині від мікротвердості вихідної структури матеріалу.

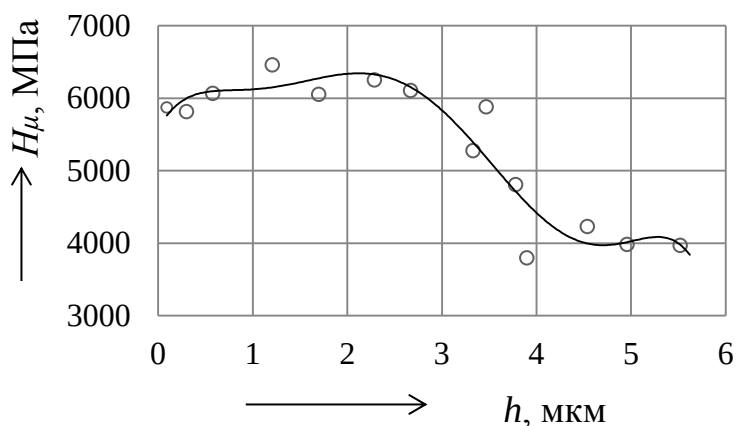


Рис. 12. Зміна мікротвердості поверхні після ППДЗ

Наявності мікротріщин у ході досліджень не було виявлено. Аналіз результатів показав відповідність якості поверхні вимогам, запропонованим до оброблених поверхонь деталей.

Проведені випробування (прискореним методом) показали, що ППДЗ легованих сталей (40X) приводить до підвищення його абразивної зносостійкості в 2,28 рази, що можна пояснити структурою зміцнення, утворенням мартенситу та підвищенням твердості. На рис. 13 наведені криві зношування зубчастих передач. Зношування оцінювалося по зміні товщини зуба як різниця товщин зуба по ділильній окружності до випробування й після певного часу роботи.

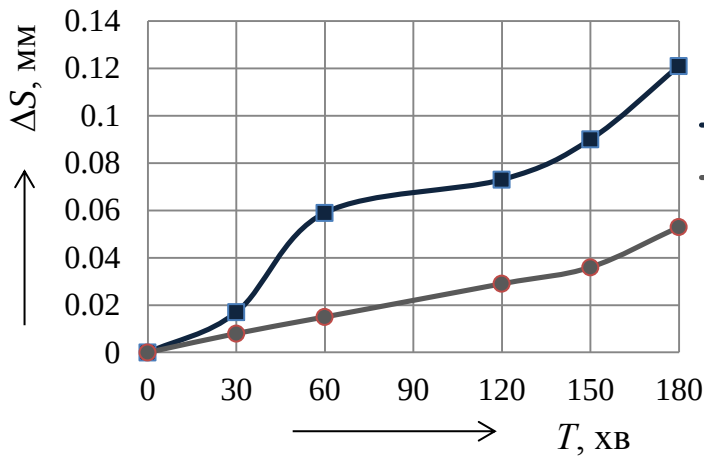


Рис. 13. Інтенсивність абразивного зношування зубчастих коліс:
1 – зношування не загартованого зубчастого колеса;
2 – зношування зубчастого колеса підданого ППДЗ

Дослідженнями встановлено, що поверхнева обробка плазмовим струменем із застосуванням скануючої магнітної системи є ефективним методом поверхневого зміцнення зубчастих коліс і забезпечує більш високі значення твердості й зносостійкості.

У п'ятому розділі розглянуто технологію і обладнання для поверхневого зміцнення зубів скануючою плазмовою дугою. При ППДЗ металева поверхня повинна нагріватися до гартівних температур, не досягаючи температури плавлення. Таке контрольоване нагрівання висуває специфічні вимоги до конструкції генератора плазмової дуги – плазмотрона, електромагнітного сканера, джерелам живлення й енергетичним параметрам їх роботи.

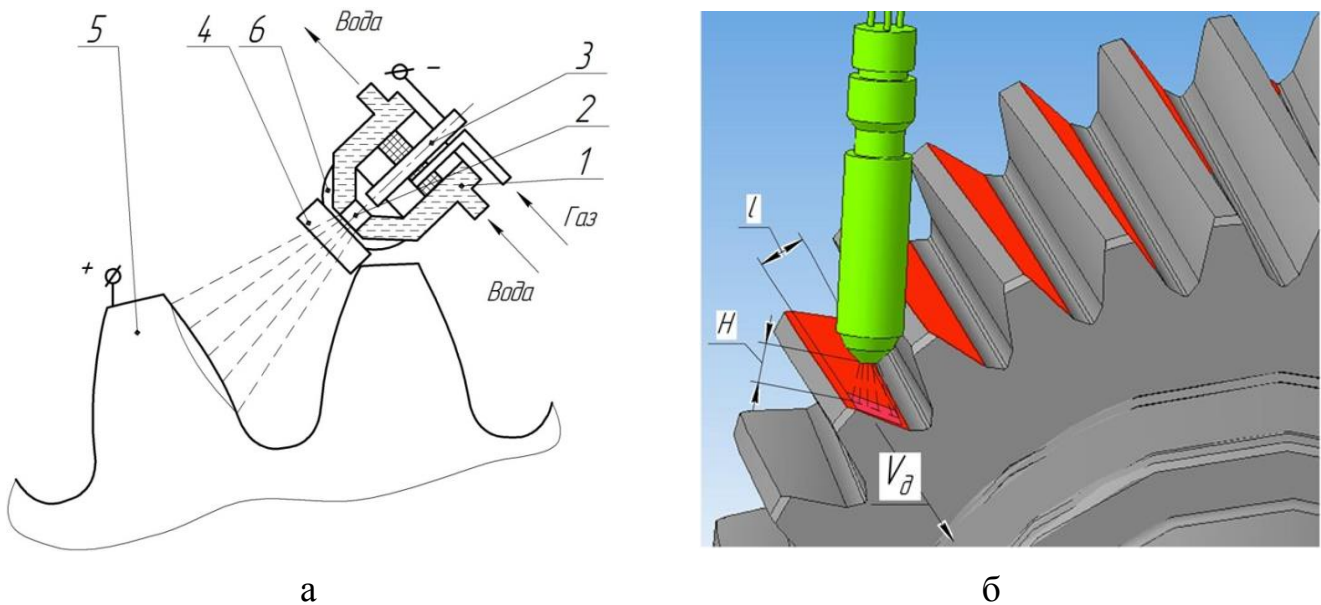


Рис. 14. Схема пристрою:

а – вид в площині обробки; (1 – плазмотрон; 2 – сопло; 3 – катод; 4 – магнітопровід; 5 – зуб шестірні; 6 – електромагнітна котушка); б – просторовий вид процесу обробки ($H = 45 \dots 60$ мм; $l = 35 \dots 65$ мм; $d_c = 5,5$ мм; $Q_{\text{пов}} = 2,5 \text{ м}^3/\text{год}$)

Спосіб реалізується таким чином (рис. 14). Зубчасте колесо або вал-шестірня встановлюються на верстаті, генератором плазми є однодуговий плазмотрон постійного струму. Для створення зовнішнього магнітного поля й тим самим зниження локальності нагрівання, плазмотрон прямої дії 1 оснащують спеціальною магнітною системою. Плазмотрон генерує електричну дугу, яка горить між катодом

З і бічною поверхнею зуба колеса 5 і в місці контакту дуги з поверхнею нагріває її. Крім того, у зазорі між торцями магнітопроводів 4 на дугу впливають магнітним полем, а так як електрична дуга є провідником зі струмом, то в магнітному полі на неї діє сила Лоренца, що відхиляє дугу в площині, яка паралельна торцям магнітопроводів 4 і перпендикулярна поздовжньої лінії зубів. Змінна напруга на котушці 6 магнітної системи забезпечує коливання електричної дуги поперек поздовжньої лінії зубів. У результаті цього, при скануванні плазмової дуги із частотою струму в мережі (50 Гц), пляма нагрівання якби витягується уздовж робочої поверхні зуба 5.

Для реалізації даного способу був створений дослідно-промисловий комплекс на базі токарного верстаті 1А660. Установка для реалізації способу ППДЗ містить: 1) плазмову установку АПР-402; 2) плазмотрон ПВР-402М з укріпленням на ньому електромагнітним сканером (рис. 15); 3) регульований трансформатор змінного струму для створення напруги в магнітній системі.

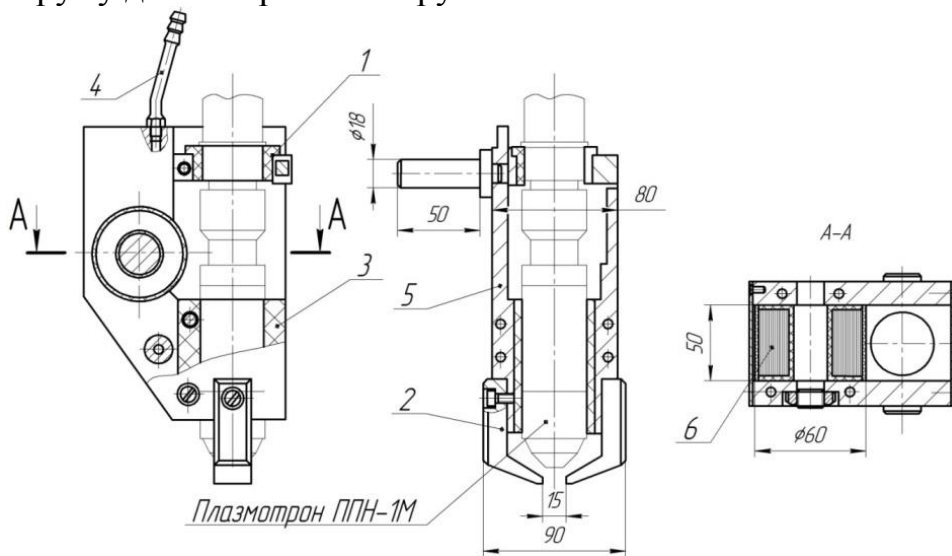


Рис. 15. Загальний вид плазмотрона з магнітно-відхиляючою системою:

- 1 – втулка ізолююча;
- 2 – наконечник;
- 3 – проставлення;
- 4 – штуцер;
- 5 – щока магнітопроводу;
- 6 – електрокотушка

Загальний вид плазмотрона з магнітно-відхиляючою системою в процесі обробки великомодульної вал-шестірни ($m = 22$) в умовах виробництва представлено на рис. 16.



Рис. 16. Процес обробки вал-шестірни методом ППДЗ в умовах виробництва

Зроблено вибір раціональних параметрів нагрівання при ППДЗ. Співвідношення розмірів джерела й величини сили струму дуги визначають значення інтенсивності:

$$q_s = \frac{I \times U \times \eta}{\ell_s \times b_n}, \quad (23)$$

де U – напруга в ланцюзі плазмової дуги; η – ККД джерела нагрівання, $\eta = 0,4$; ℓ_s , b_n – розміри джерела нагрівання.

Маючи подібний набір змінних параметрів, доцільно визначити їх раціональне співвідношення відповідно до цілей ППДЗ. У якості цільової функції можна прийняти деяку максимальну температуру підігріву поверхневих шарів, що забезпечує необхідні структурні перетворення, що визначається з виразу:

$$\theta_{\max} = \frac{2q \sqrt{\omega \times \ell_s}}{\lambda \times \sqrt{\pi \times V_\phi}}, \quad (24)$$

де q – інтенсивність джерела; λ , ω – відповідно, коефіцієнти тепло- і температуропровідності матеріалу; V_ϕ – швидкість переміщення джерела.

Вважаючи, що $\theta_{\max}$ дорівнює температурі плавлення, визначимо швидкість переміщення джерела V_ϕ , при якій буде виконуватися умова $\theta_n \leq \theta_{\max}$:

$$V_\phi = \left(\frac{I \times U \times \eta}{\theta_{nl} \times \epsilon_n \times \ell_s \times \lambda} \right)^2 \times \frac{\omega \times \epsilon_n}{\pi}. \quad (25)$$

Процес ППДЗ має ряд специфічних особливостей, внаслідок яких існують обмеження, що накладаються на параметри процесу нагрівання. Для вибору оптимальних значень останніх, аналіз обмежень є досить істотним.

Розрахунок очікуваного економічного ефекту від використання способу ППДЗ дав такі результати: річний економічний ефект дорівнює 342650 грн; термін окупності проекту – 0,83 року; коефіцієнт економічної ефективності – 1,2.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена *актуальна науково-технічна проблема*, – підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих передач шляхом застосування поверхневого плазмово-дугового зміцнення.

Основні наукові та практичні результати роботи можна узагальнити в таких висновках:

1. Одним із найбільш перспективних напрямків розвитку сучасного виробництва є впровадження інтенсивних технологій поверхневого зміцнення великомодульних зубчастих передач з використанням концентрованих джерел енергії. Особливі переваги стосовно масивних деталей має поверхневе плазмово-дугове зміцнення, завдяки високій тепловій потужності та можливості одержання зміцнених шарів значної товщини (до 5 мм). Проте, властивості зміцнених шарів після поверхневого плазмово-дугового зміцнення досліджені недостатньо, не запропоновано раціональних шляхів зручного регулювання питомої потужності в плямі нагріву плазмової дуги, відсутні науково обґрунтовані принципи вибору режимів і технологій зміцнення ве-

лико-модульних зубчастих шестірень з урахуванням умов їх навантаження. Тому, підвищення зносостійкості відкритих великомодульних зубчастих передач рудорозмельних млинів, шляхом поверхневого плазово-дугового зміцнення, має важливе практичне значення і є актуальним науковим завданням.

2. Досліджено й визначено причини і характер руйнувань зубчастих зачеплень приводів рудорозмельних млинів, встановлено, що великомодульні зубчасті передачі не повністю забезпечують нормативний ресурс через передчасний вихід з ладу зубчастих елементів, в наслідок чого обґрунтовано можливості підвищення зносостійкості, а тим самим і строку служби цих передач на 33,7% шляхом плазово-дугового зміцнення робочих поверхонь зубів.

3. Дослідження властивостей сталей після поверхневої плазово-дугової обробки забезпечено розробленими методиками: для випробувань на зношування розроблено установку і методику прискорених випробувань на зносостійкість в умовах відповідних реальним, а також розроблена методика розрахунків оптимальних режимів плазової обробки зразків, що заснована на обліку теплофізичних параметрів плазового струменя.

4. Розглянуто особливості технології плазового зміцнення поверхонь зубів великомодульних коліс та сформульовано критерії придатності плазової дуги для поверхневого плазово-дугового зміцнення: плазова дуга має рухатись зі швидкістю, що перевищує швидкість поширення тепла в матеріалі оброблюваної деталі, а її поверхнева ефективна питома потужність не повинна перевищувати 10^8 Вт/м². Це вимагає застосування плазової дуги, що сканує за рахунок накладення на потік генерованої плазми зовнішнього магнітного поля. Реалізація даного методу була проведена при промислових випробуваннях на АТ ««КОРУМ» КЗГО» (додаток В) в ході яких були встановлені технологічні режими, що дозволяють отримати зміцнення поверхневого шару на глибину 1,5–4 мм з забезпеченням твердості 57HRC.

5. Досліджено вплив технологічних параметрів даного процесу на зносостійкість і механізми зношування поверхневого шару, а саме сила струму (I), швидкість руху (V) та інтенсивність (q) джерела нагрівання. Встановлено, що значне зниження зношування буде відбуватися при впливі на фізико-механічні властивості матеріалів з яких виготовлені зубчасті передачі, а саме збільшенні твердості контактних поверхонь зубів шляхом плазового зміцнення. В умовах ППДЗ ефективність плазової дуги, як джерела нагрівання, суттєво залежить від співвідношення розмірів теплового джерела, його швидкості й теплової потужності; раціональним слід уважати таке їх співвідношення, при якому температура поверхні, що нагрівається, на задній границі плями нагрівання досягає, але не перевищує температури плавлення для даного матеріалу.

6. В результаті математичного моделювання встановлено вплив параметрів режиму поверхневого плазово-дугового зміцнення (сили струму I та швидкості переміщення джерела нагрівання V_d) на відносний термін експлуатації великомодульних зубчастих коліс x . Це дозволило отримати оптимальні співвідношення параметрів процесу, які забезпечують найкращі показники, щодо зносостійкості робочих поверхонь великомодульних зубчастих передач ($V_{opt} = 350$ мм/хв, $I_{opt} = 245$ А).

7. Експериментально встановлена закономірність формування загартованого шару при поверхневому плазово-дуговому зміцненні великомодульних зубчастих

коліс. Показано, що при швидкісному нагріванні без оплавлення плазмовою дугою прямої дії, яка сканує в змінному магнітному полі, швидкість охолодження поверхневих шарів досягає швидкості гартування, що забезпечує структурні перетворення в металі та формує зміцнений поверхневий робочий шар (межа міцності σ_b та твердість HRC зростають). Це забезпечує високі експлуатаційні характеристики поверхневого робочого шару: зносостійкість зубчастих передач підвищується в 2,28 разу.

8. Розроблено спосіб термічної обробки великомодульних зубчастих коліс, що включає нагрів бічної поверхні зуба без оплавлення плазмовою дугою із заданою силою струму, при цьому переміщення дуги проводять поступально від одного торця зубчастого колеса до іншого, зі швидкістю, що перевищує швидкість поширення температури в даному матеріалі.

9. Розроблено та створено комплекс спеціалізованого обладнання для реалізації технологічної схеми плазмово-дугового поверхневого зміцнення робочих поверхонь великомодульних зубчастих передач без оплавлення, з використанням оригінальної конструкції магнітно-відхиляючої системи для створення зовнішнього магнітного поля. Розроблені технологічні процеси знайшли дослідно-промислове застосування та впроваджені у виробничий процес зазначеного способу на підприємствах: ТОВ «Бізнес – Трейд плюс» (від 18.04.2016 р.), АТ ««КОРУМ» КЗГО» (від 27.05.2016 р.), що засвідчено відповідними актами.

10. Проведено розрахунок економічної ефективності від використання технології підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих передач методом ППДЗ, та встановлено, що очікуваний річний економічний ефект для 16 однотипних вал-шестірень складає 342650 грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Рязанцев А.А. Особенности тепловых процессов при обработке заготовок с плазменным нагревом / В.П. Нечаев, А.А. Рязанцев // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг. – 2010. – Вип. 26. – С. 157–160.

2. Рязанцев А.О. Критерії вибору джерела нагрівання для умов поверхневої плазмової обробки / В.П. Нечаєв, А.О. Рязанцев // Вісник Криворізького технічного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг. – 2011. – Вип. 29. – С. 172–176.

3. Рязанцев А.А. Исследование, разработка, обоснование возможностей повышения надежности работы крупномодульных шестерен путем плазменного упрочнения их поверхностей / В.П. Нечаев, А.А. Рязанцев // Міжнародний збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. – Донецьк. – 2012. – Вип. 1,2(43). – С. 227–232.

4. Рязанцев А.А. Модификация свойств поверхностных слоев тяжело нагруженных деталей горных машин посредством плазменного упрочнения / В.П. Нечаев, А.А. Рязанцев // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг. – 2012. – Вип. 32. – С. 123–127.

5. Ryazantsev A.A. Analysis of means of reliability and service life growth for open gear drive of ore-pulverizing mills [Електронний ресурс] / A.A. Ryazantsev // Metal-

?rgical and Mining Industry. – 2014. – № 3. – Р. 16–22. – Режим доступу до журн.: <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/4.2014.pdf>.

6. Рязанцев А.А. Анализ и оценка износа зубчатых передач рудоразмольных мельниц, и разработка технологии повышения их срока службы / В.П. Нечаев, А.А. Рязанцев // Гірничий вісник Криворізького національного університету : наук.-техн. зб. – Кривий Ріг. – 2015. – Вип. 99. – С. 139–145.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Рязанцев А.О. Плазмове зміцнення деталей приводів кар'єрних екскаваторів / В.П. Нечаєв, А.О. Рязанцев // Сталый розвиток гірничо-металургійної промисловості: Міжнар. наук.-техн. конф., 25–28 трав. 2011 р. : тези доп. – Кривий Ріг, 2011. – Т.1. – С. 124–125.

8. Рязанцев А.А. Теоретико-методологические особенности плазменного упрочнения поверхностей крупномодульных зубчатых колес / В.П. Нечаев, А.А. Рязанцев // Технологии упрочнения нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: 14 научно-практическая конференция, 17–20 апр. 2012 г. – Санкт-Петербург, 2012. – Ч. 2. – С. 257–260.

9. Рязанцев А.А. Влияние упрочнения рабочих поверхностей зубьев на повышение ресурса зубчатых передач / А.А. Рязанцев // Сталый розвиток промисловості та суспільства: Міжнар. наук.-техн. конф., 22–25 трав. 2013 р. : тези доп. – Кривий Ріг, 2013. – Т. 1. – С. 220–221.

10. Рязанцев А.А. Анализ и оптимизация системы критериев предельных состояний высоконагруженных открытых зубчатых передач / В.П. Нечаев, А.А. Рязанцев // Научно-техническое творчество: проблемы и перспективы : VIII Всероссийская конференция-семинар, 31 мая – 01 июня 2013 г. – Самара, 2013. – С. 41–46.

11. Рязанцев А.А. Повышение надежности крупномодульных зубчатых колес путем плазменного упрочнения рабочих поверхностей зубьев / А.А. Рязанцев // Молодежь и наука: модернизация и инновационное развитие страны : междунар. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых, 5–8 июня 2013 г. – Пенза, 2013. – С. 135–140.

12. Рязанцев А.А. Анализ критериев предельных состояний высоконагруженных открытых зубчатых передач / В.П. Нечаев, А.А. Рязанцев // Проблемы энергосбережения и механизации в горно-металлургическом комплексе: X междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, 03 июня 2014 г. – Кривой Рог, 2014. – С. 115–121.

13. Рязанцев А.О. Розробка технології підвищення довговічності відкритих зубчастих передач рудорозмольних млинів / А.О. Рязанцев // Сталый розвиток промисловості та суспільства: Міжнар. наук.-техн. конф., 20–22 трав. 2015 р. : тези доп. – Кривий Ріг, 2015. – Т. 1. – С. 219.

14. Рязанцев А.А. Инновационная технология плазменного упрочнения элементов силовых передач рудоразмольных мельниц / А.А. Рязанцев // Фізичні та комп'ютерні технології: Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених, 07–09 груд. 2016 р. : тези доп. – Харків, 2016. – Т. 1. – С. 270–273.

15. Рязанцев А.О. Інноваційна технологія плазмового зміцнення робочих поверхонь зубчатих коліс / А.О. Рязанцев // Розвиток промисловості та суспільства: Міжнар. наук.-техн. конф., 24–26 трав. 2017 р. : тези доп. – Кривий Ріг, 2017. – Т. 1. – С. 306.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

16. Пат. 103171 Україна, МПК C21D9/32. Спосіб термічної обробки крупномодульних зубчастих коліс / Нечаєв В.П., Рязанцев А.О.; заявник і патентовласник ДВНЗ «Криворізький національний університет». – №U 2015 04396; заявл. 05.05.15; опубл. 10.12.15, Бюл. №23.

АНОТАЦІЯ

Рязанцев А.О. Підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих передач поверхневим плазмово-дуговим зміцненням – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.07 «Процеси фізико-технічної обробки». – Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, 2018.

Робота присвячена підвищенню зносостійкості великомодульних зубчастих передач за рахунок застосування інноваційного методу поверхневого плазмово-дугового зміцнення (ППДЗ) робочих поверхонь зубів.

Визначено вплив фізико-механічних властивостей матеріалів зубчастих коліс на інтенсивність зношення в період припрацювання та встановленого рівномірного зносу контактних поверхонь зубів, а також обґрунтовані можливості їх продуктивного поверхневого плазмово-дугового зміцнення. Розроблено методику визначення й оцінки залишкового ресурсу великомодульних зубчастих передач після ППДЗ та досліджено вплив технологічних параметрів даного процесу на зносостійкість і механізми зношування поверхневого шару. Проведено оптимізацію параметрів процесу підвищення зносостійкості зубчастих передач, шляхом математичного моделювання процесів ППДЗ зубчастих коліс та отримані оптимальні співвідношення величини швидкості руху джерела нагрівання й сили струму плазмової дуги ($V_{opt} = 350$ мм/хв, $I_{opt} = 245$ А), що дозволило встановити збільшення строку експлуатації зубчастих коліс. Експериментально досліджено процес ППДЗ, розроблено й реалізовано методику теплофізичних досліджень, зроблена оцінка отриманих фізико-механічних властивостей та твердості оброблюваного матеріалу при плазмовому нагріванні. Експериментально досліджено підвищення довговічності роботи великомодульних зубчастих передач, що пройшли ППДЗ і проведено розрахунки на довговічність за параметром зношення, та встановлено, що застосування даного способу термічної обробки збільшує зносостійкість в 2,28 рази.

Розроблено та створено комплекс спеціалізованого обладнання для реалізації технологічної схеми плазмово-дугового поверхневого зміцнення робочих поверхонь великомодульних зубчастих передач без оплавлення, з використанням оригінальної конструкції магнітно-відхиляючої системи для створення зовнішнього магнітного поля.

Ключові слова: поверхнєве плазмово-дугове зміцнення, великомодульні зубчасті передачі, швидкорухоме джерело нагрівання, зносостійкість.

АННОТАЦИЯ

Рязанцев А.О. Повышение износоустойчивости крупномодульных зубчатых передач поверхностным плазменно-дуговым упрочнением – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.03.07 «Процессы физико-технической обработки». – Центрально-украинский национальный технический университет, Кропивницкий, 2018.

Работа посвящена повышению износоустойчивости крупномодульных зубчатых передач за счет применения инновационного метода поверхностного плазменно-дугового упрочнения (ППДУ) рабочих поверхностей зубьев.

Выполнен анализ видов изнашивания и повреждение зубьев открытых пар рудоразмольных мельниц. Сопоставлением экспериментальных скоростей изнашивания с расчетными величинами, которые характеризуют геометрию и кинематику зацепления, получен параметр, который учел абразивное влияние среды и физико-механические свойства материалов зубов для данных условий эксперимента. Проведен критический анализ подходов для решения проблемы повышения надежности и долговечности открытых крупномодульных зубчатых передач. Определено влияние физико-механических свойств материалов зубчатых колес на интенсивность износа в период приработки и установленного равномерного износа контактных поверхностей зубов, а также обоснована возможность их плазменно-дугового упрочнения.

Разработана методика определения и оценки остаточного ресурса крупномодульных зубчатых передач после ППДУ и исследовано влияние технологических параметров данного процесса на износоустойчивость и механизмы изнашивания поверхностного слоя. Проведена оптимизация параметров процесса повышения износоустойчивости зубчатых передач, путем математического моделирования процессов ППДУ зубчатых колес, и получены оптимальные соотношения величины скорости движения источника нагрева и силы тока плазменной дуги ($V_{opt} = 350$ мм/мин, $I_{opt} = 245$ А), что позволило установить увеличение срока эксплуатации зубчатых колес. Экспериментально исследован процесс ППДУ, разработана и реализована методика теплофизических исследований, сделанна оценка полученных физико-механических свойств и твердости обрабатываемого материала после плазменного нагрева. Экспериментально исследовано повышения долговечности работы крупномодульных зубчатых передач, которые прошли ППДУ и проведены расчеты на долговечность по параметру износа, и установлено, что применение данного способа термической обработки увеличивает износостойкость в 2,28 раза.

Разработан и создан комплекс специализированного оборудования для реализации технологической схемы плазменно-дугового поверхностного упрочнения рабочих поверхностей крупномодульных зубчатых передач без оплавления, с использованием оригинальной конструкции магнитно-отклоняющей системы для создания внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: поверхностное плазменно-дуговое упрочнение, крупномодульные зубчатые передачи, быстродвижущийся источник нагрева, износостойкость.

SUMMARY

Riazantsev A.O. Improvement of wear resistance of large-modular gears by surface plasma-arc reinforcement. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.03.07 «Processes of physical and technical processing». – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytsky, 2018.

The work is devoted to the increase of wear resistance of large-modular gears due to the application of the innovative method of surface plasma-arc reinforcement (SPAR) working surfaces of teeth.

The influence of the physical and mechanical properties of the gear wheels' material on the intensity of wear in the period of tire work and the established uniform wear of the contact surfaces of the teeth has been determined, as well as the substantiated possibilities of their productive surface plasma-arc reinforcement. The method of determination and estimation of the residual resource of large-modular gear transmissions after SPAR is developed and the influence of technological parameters of this process on wear resistance and mechanisms of deterioration of the surface layer have been investigated. The optimization of the parameters of the process of increasing the wear resistance of gears by means of mathematical modeling of the SPAR processes of gear wheels was carried out and the optimal ratios of the velocity of the heat source movement and the current strength of the plasma arc ($V_{\text{opt}} = 350 \text{ mm/min}$, $I_{\text{opt}} = 245 \text{ A}$) were obtained, which allowed establishing an increase in service life gear wheels. The process of SPAR has been experimentally investigated, the method of thermophysical research has been developed and implemented, an estimation of the obtained physical and mechanical properties and hardness of the processed material during plasma heating has been made. The increase of durability of the work of large-modular gears passing by the SPAR has been experimentally investigated and the calculations on durability have been performed for the wear parameter, and it has been established that the application of this heat treatment method increases the durability 2.28 times.

A complex of specialized equipment was developed for the implementation of the technological scheme of plasma-arc surface reinforcement of the large-modular gears' working surfaces without melting, using the original design of the magnetic-deflection system for the creation of an external magnetic field.

Keywords: superficial plasma-arc reinforcement, large-modular gears, fast-moving heat source, wear resistance.

РЯЗАНЦЕВ Антон Олександрович

**Підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих передач
поверхневим плазмово-дуговим зміцненням**

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.03.07 – процеси фізико-технічної обробки

Підписано до друку 30.01.2018.
Формат 60×84/16. Ум. др. арк. – 1,40. Авт. арк. – 0,9.
Тираж – 100 пр.

Друкарня С. Г. Щербенка «Літерія»
вул. Рокоссовського, 5/3, м. Кривий Ріг, 50027
097-192-20-77

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4561 від 13.06.2013 р.