

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РЯЗАНЦЕВ АНТОН ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.791.927.55

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня **кандидата технічних наук**

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

_____ / А.О. Рязанцев/

Науковий керівник: Нечаєв Василь Павлович
кандидат технічних наук, доцент

Кривий Ріг – 2018

АНОТАЦІЯ

Рязанцев А.О. Підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих передач поверхневим плазмово-дуговим зміцненням – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) 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.

У промисловості широке розповсюдження знаходять великогабаритні та великомодульні зубчасті передачі. Наприклад, шарові млини, призначені для подрібнення різних руд, вугілля та іншої сировини, обладнуються відкритими зубчастими передачами. Вони також як і всі відкриті передачі працюють в умовах ударно-циклічних контактних навантажень. Характерними причинами зниження несучої здатності є не тільки знеміцнення зуба у його основі, а й втомне викришування контактної поверхні та знос профілю зуба. Ключовими питаннями при проектуванні зубчастих передач є вибір матеріалу зубчастої передачі і способу його зміцнення. Проведено аналіз видів зношування і пошкодження зубів відкритих пар рудорозмельних млинів. Співставлено експериментальні швидкості зношування з розрахунковими величинами, що характеризують геометрію і кінематику зачеплення, отримано параметр, який врахував абразивний вплив середовища та фізико-механічні властивості матеріалів зубів для даних умов експерименту.

Проведено критичний аналіз підходів для вирішення проблеми підвищення надійності та довговічності відкритих великомодульних зубчастих передач. Визначено вплив фізико-механічних властивостей матеріалів зубчастих коліс на інтенсивність зношення в період припрацювання та встановленого

рівномірного зносу контактних поверхонь зубів, а також обґрунтовано 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. Отримано 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. 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.

Наукова новизна одержаних результатів полягає:

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 перевищує 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_0) 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.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

- 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 використовується для приварювання термопар з метою дослідження теплових полів при ППДЗ.

Ключові слова: поверхневе плазмове-дугове зміцнення, великомодульні зубчасті передачі, швидкокорухоме джерело нагрівання, зносостійкість.

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, Kropivnitsky, 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.

In the industry, large-scale and large-body gear transmissions are widespread. For example, ball mills, intended for grinding various ores, coal and other raw materials, are equipped with open gears. They also, like all open transmissions, work under shock-cyclic contact loads. Characteristic reasons for lowering the bearing capacity are determined not only by the hardening of the tooth in its base but also by fatigue cracking of the contact surface and wear of the profile of the tooth. The key issues in the design of gear transmissions are the selection of gear material and the method of strengthening it. The analysis of types of wear and damage of teeth of open pairs of ore-grinding mills has been carried out. Comparison of experimental wear rates with the estimated values characterizing the geometry and kinematics of the grip received a parameter that took into account the abrasive influence of the medium and the physical and mechanical properties of the materials of the teeth for these experimental conditions.

A critical analysis of approaches to solving the problem and increasing the reliability and durability of open, large-modular tooth gearings has been carried out. 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.

The scientific novelty of the obtained results is:

1. For the first time the regularity of the formation of a tempered layer during superficial plasma-arc reinforcement of large-modular gear wheels has been established. It is shown that in the case of high-speed heating without melting by a

plasma arc direct action. Such arc scans in an alternating magnetic field and the rate of cooling of the surface layers reaches the rate of quenching, which provides structural transformations in the metal and forms a strengthened surface working layer (the strength of σ_v and hardness HRC increase). This ensures high performance of the surface working layer: wear resistance of gears increases 2.28 times.

2. For the first time, the criteria for the suitability of the plasma arc for surface plasma arc strength have been formulated: the plasma arc should move at a rate exceeding the rate of heat propagation in the workpiece's material, and its surface specific effective power should not exceed 108 W / m². This requires the use of a plasma arc scanning due to the imposition of an external magnetic field on the plasma generated by the stream.

3. The analytical connection was first established and the influence of the parameters of the surface plasma-arc reinforcement mode (current strength I and the velocity of the heating source Vd) on the relative lifetime of the large-toothed gear wheels was found. This allowed to obtain optimal ratios of process parameters, which provide the best performance in terms of wear resistance of the working surfaces of large-body gears.

The practical value of the work is as follows:

- the research of the structure and operational properties of reinforced surface layers has been carried out. The basic requirements and principles of the optimal technological parameters of the SPAR choosing have been developed for increasing the efficiency of large-wheel gear wheels depending on of their operation conditions;
- an original design of the magnetic-deflection system was proposed and created for the creation of an external magnetic field. As a result locality of the the plasma source decreased;
- developed an industrial stand for the implementation of the technology SPAR of high-modulus gear transmission gearboxes by request for utility model No. 103171; from 10.12.15 «Method of large-wheel gear wheels heat refinement»;
- an installation prototype for tests on gear wheels wear resistance with a strengthened surface layer was developed;

- an original device for condenser welding was developed and created. It was used for welding thermocouples for the study of thermal fields at SPAR.

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

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] / А.А. Ryazantsev // Metallurgical 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 // Сталий 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. 2012г. – 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 // Сталий 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 // Сталій 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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	14
ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1. ПОВЕРХНЕВЕ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ВЕЛИКОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ ЯК ВИСОКОЕФЕКТИВНА АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНИМ ТЕХНОЛОГІЯМ	22
1.1. Проблеми експлуатації та закономірності зношування відкритих великомодульних зубчастих передач	22
1.2. Аналіз методів і технологій поверхневого зміцнення	31
1.3. Сучасний стан теорії та практики використання плазмово- дугового нагрівання для термічної обробки металів і сплавів	36
Висновки до розділу 1	48
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	50
2.1. Методика проведення поверхневого плазмово-дугового зміцнення робочих поверхонь великомодульних зубчастих передач ...	50
2.1.1. Обґрунтування конструктивних параметрів плазмотрона	53
2.1.2. Матеріали та зразки для проведення досліджень	54
2.2. Методика металографічних досліджень	55
2.3. Методика теплофізичних досліджень	57
2.3.1. Методика дослідження тепловкладення при плазмовому нагріванні	57
2.3.2. Оцінка динамічної твердості поверхні після плазмового нагрівання	61
2.4. Методика розрахунків і випробувань відкритих зубчастих передач на довговічність за умови зношування зубів	62
2.4.1. Методика виміру зношування зубів	62
2.4.2. Оцінка ресурсу зубчастих коліс зі зміцненими зубами	62
2.4.3. Обґрунтування методики випробувань на зносостійкість	65
Висновки до розділу 2	69

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОЇ ОБРОБКИ ВЕЛИКО-МОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС	70
3.1. Теоретичне обґрунтування можливості збільшення залишкового ресурсу зубчастих коліс шляхом впливу на поверхневу твердість концентрованими джерелами енергії	70
3.2. Оптимізація параметрів процесу підвищення зносостійкості зубчастих передач	83
3.3. Математичне моделювання процесів поверхневого плазмОВО-дугового зміцнення великомодульних зубчастих коліс	87
Висновки до розділу 3	109
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕЛИКО-МОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ ШЛЯХОМ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗМІЦНЕННЯ	112
4.1. Дослідження процесу зношування відкритих зубчастих передач ..	112
4.1.1. Вимір зношування зубів і аналіз отриманих результатів ...	112
4.1.2. Дослідження закономірностей абразивного зношуванні відкритих зубчастих передач рудорозмельних млинів	114
4.2. Аналітичний розрахунок температурного поля заготовки, яке виникає від дії плазмОВОЇ дуги, що сканує	122
4.3. Тепловкладення при поверхневому плазмОВО-дуговому зміцненні	130
4.4. Зміна фізико-механічних властивостей матеріалу від дії плазмОВОЇ дуги, що сканує	134
4.4.1. Структурні перетворення при нагріванні плазмОВОЮ дугою, що сканує	135
4.4.2. Зміна твердості шарів припуску в процесі охолодження й дослідження якості обробленої поверхні	139

4.5. Оцінка інтенсивності зношування зубчастих коліс після поверхневого плазово-дугового зміцнення	142
Висновки до розділу 4	144
РОЗДІЛ 5. ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ВЕЛИКОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС	146
5.1. Технологія та обладнання поверхневого зміцнення зубів плазовою дугою, що сканує	146
5.2. Вибір раціональних параметрів нагрівання при поверхневому плазово-дуговому зміцненні	153
5.3. Розрахунок економічного ефекту від використання технології та обладнання поверхневого зміцнення великомодульних зубчастих коліс	159
Висновки до розділу 5	163
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	164
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	168
ДОДАТКИ	
Додаток А. Довідка розрахунку очікуваної економічної ефективності від використання результатів науково – дослідної роботи	181
Додаток Б. Розрахунок відкритих зубчастих передач рудорозмельних млинів на довговічність по зношуванню	182
Додаток В. Акт виробничого випробовування процесу поверхневого плазового зміцнення	189
Додаток Г. Акт впровадження результатів науково-дослідної роботи	191
Додаток Д. Акт впровадження результатів науково-дослідної роботи	192
Додаток Е. Акт впровадження в навчальний процес результатів дисертаційних досліджень	194
Додаток Ж. Висновок експертизи щодо умов патентоздатності	195
Додаток З. Патент	199
Додаток И. Список публікацій здобувача за темою дисертації	205

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ППДЗ	–	поверхнєве плазмове-дугове зміцнення
ЗТВ	–	зона термічного впливу
СВЧ	–	струм високої частоти
СПД	–	плазмова дуга, що сканує
КДЕ	–	концентроване джерело енергії
ХТО	–	хіміко-термічна обробка
ВКДН	–	висококонцентроване джерело нагрівання
ЦКП	–	центральне композиційне планування
ЦКРП	–	центральне композиційне рототабельне планування
ПФЕ	–	повний факторний експеримент
ККД	–	коефіцієнт корисної дії
ΔS	–	величина зношування зубів, мм
U	–	швидкість зношування зубів, мм/цикл
V_{δ}	–	швидкість переміщення джерела нагрівання, мм/хв
l_s	–	довжина джерела, мм
ω	–	коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$
λ	–	коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$
θ	–	температура, $^{\circ}\text{C}$
q	–	інтенсивність джерела нагрівання, $\text{Вт}/\text{м}^2$
I	–	сила струму плазмової дуги, А
U	–	напруга в ланцюзі дуги, В
W	–	теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$
C_{θ}	–	теплова потужності, МВт
d_c	–	діаметр сопла плазмотрону, мм

ВСТУП

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 плазово-дугове зміцнення, завдяки високій тепловій потужності та можливості одержання зміцнених шарів значної товщини (до 5 мм). Проте, властивості зміцнених шарів після поверхневого плазово-дугового зміцнення (ППДз) досліджені недостатньо, а також не запропоновані раціональні шляхи зручного регулювання питомої потужності в плямі нагріву плазової 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 плазово-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 плазмового 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 плазмово-дугового зміцнення.

Сформульована мета роботи обумовила необхідність розв'язання таких задач:

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

2 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;

3 дослідження впливу технологічних параметрів ППДЗ на зносостійкість і механізми зношування поверхневого шару та розробка методики визначення й оцінки ресурсу великомодульних зубчастих передач після ППДЗ;

4 оптимізація технологічних параметрів режиму поверхневого плазмово-дугового зміцнення шляхом математичного моделювання з метою виявлення їх впливу на відносний термін експлуатації великомодульних зубчастих;

5 експериментальні дослідження процесу поверхневого плазмово-дугового зміцнення, розробка та реалізація методики теплофізичних досліджень;

6 експериментальне дослідження довговічності зубчастих передач, що пройшли ППДЗ і їх розрахунки на довговічність за параметром зношення;

7 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 зубчатих 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: плазмova 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 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 зубчатих коліс»;
- розроблено дослідний зразок установки для випробовувань на зносостійкість зубчатих коліс із зміцненим поверхневим шаром;
- розроблено та створено оригінальний пристрій для здійснення конденсаторного зварювання, який було використано для приварювання термпар 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». Очікуваний економічний ефект становить 342650 грн на рік.

Особистий внесок здобувача.

Усі 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 зубчастих 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.

РОЗДІЛ 1

ПРОЦЕС ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ВЕЛИКОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ, ЯК ВИСОКОЕФЕКТИВНА АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНИМ ТЕХНОЛОГІЯМ

1.1. Проблеми експлуатації та закономірності зношування відкритих великомодульних зубчастих передач

Однією з основних умов, яка повинна задовольняти технологічне обладнання, є його безвідмовна робота з необхідною надійністю й довговічністю відповідно до технічних умов експлуатації протягом заданого періоду часу. Основними причинами виходу з ладу деталей є зношування, на частку якого доводиться 60-80 % від загальної кількості виходів з ладу вузлів і деталей, і втомне руйнування.

Тому особливу увагу слід приділяти підвищенню їх зносостійкості й втомній міцності, що суттєво залежать від правильного вибору матеріалу, технологічних, конструкторських і інших методів підвищення надійності й довговічності, закономірності впливу різних факторів. Вони ґрунтуються на зміні твердості й шорсткості поверхонь сполучених елементів, режимів механічної, термічної або хіміко-термічної обробки (ХТО), на можливості герметизації сполучень, розосередження навантаження й ін. У першу чергу це відноситься до зубчастих коліс, які є одними з найбільш навантажених і відповідальних елементів і нерідко визначають надійність і довговічність обладнання в цілому.

Жорсткі умови експлуатації, зумовлювані взаємодією з робітничим середовищем, несприятливими зовнішніми умовами: підвищена вологість, запиленість, зміна температури в широкому діапазоні для гірничих машин, що експлуатуються на відкритих гірничих роботах; збільшують у 1,5 – 2 рази трудомісткість робіт з монтажу, налагодження, технічного обслуговування й

поточного ремонту гірничих машин у порівнянні з комфортними умовами майстерень. Питання надійності цих машин стоїть дуже гостро. Вихід з ладу великомодульної зубчастої передачі звичайно сполучений з більшим економічним збитком для виробництва, оскільки аварійний стан зубчастої передачі призводить до зупинки агрегату, простою технологічного обладнання й зниженню обсягів випуску кінцевого продукту. Для заміни великогабаритної зубчастої передачі потрібен значний час, що пов'язаний з її виготовленням і доставкою.

У гірничій промисловості знайшли широке поширення великомодульні відкриті передачі зовнішнього зачеплення. Для шестірень відкритих передач в якості матеріалів використовують сталі: 30ХГМ, 45, 40ХН1М, 40Х, 32ХГМТ, для зубчастих вінців – ливарні сталі 55Л, 35Л. Як правило, зубчасті вінці не термозміцнюються й мають твердість $HV_1=260\div300$, $HV_2=180\div200$. Так само як і закриті передачі, відкриті, як правило, мають евольвентний профіль зуба, є циліндричними прямозубими або з малим нахилом зубів ($\beta=30'\div7^\circ$), наприклад у ряді барабанних млинів, які експлуатуються в умовах гірничозбагачувальних комбінатів Кривого Рогу.

У результаті дослідження номенклатури великомодульних зубчастих коліс, які використовуються на підприємствах гірничої промисловості зроблено висновок, що особлива увага з продовження терміну служби необхідно приділити зубчастим передачам, які застосовуються на кульових млинах. Кульові млини призначені для подрібнення різних руд, вугілля й іншої сировини, обладнаються відкритими зубчастими передачами, модуль зубів яких дорівнює $m = 20\ldots34$ мм, ширина зубчастого вінця $b = 600\ldots1000$ мм (рис 1.1). Вони працюють в умовах ударно-циклічних контактних навантажень, що викликає високі вимоги до несучої здатності зубчастої передачі [1].

Ключовими питаннями при проектуванні й виготовленні зубчастих передач є вибір матеріалу й способу його зміцнення.

Проблемі підвищення працездатності зубчастих передач конструкторськими, технологічними й експлуатаційними заходами присвячено

безліч досліджень. У цій області значні роботи 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 та ін. [2-10].

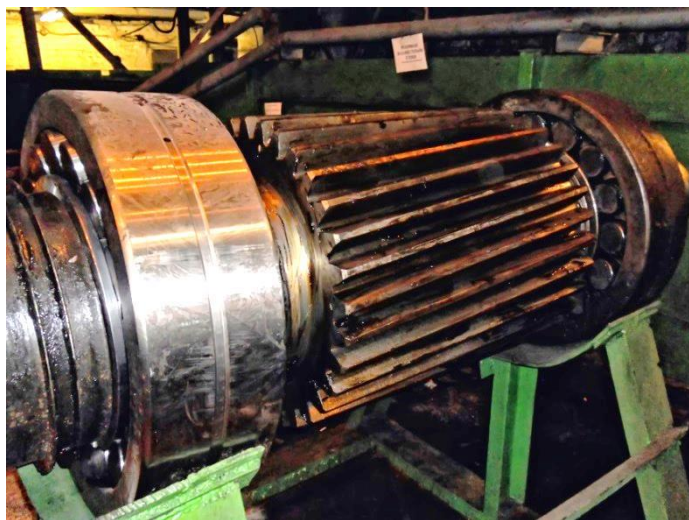


Рис. 1.1. Великомодульна ($m = 20$) вал-шестірня рудорозмельного млина

Вагомі теоретичні й експериментальні роботи в області підвищення надійності й технологічності зубчастих передач належать вітчизняним ученим І.О. Болотовському, Е.Б. Булгакову, В.А. Гавриленко, В.К. Кудрявцеву, С.І. Лашневу, Б.А. Тайцу й ін. [11-16].

В умовах великого вибору конструктивних і технологічних напрямків не завжди вдається прийти до єдиного правильного розв'язку завдання підвищення експлуатаційних властивостей зубчастих передач. Найчастіше при виготовленні зубчастих коліс використовуються традиційні методи обробки, що включають одержання заготовки в основному методами штампування, попередню й остаточну токарну обробку, нарізку зубів лезовим інструментом, гартування СВЧ евольвентного профілю до HRC 50-62 і наступне зубошліфування.

Отже, підвищення зносостійкості й довговічності роботи великомодульних зубчастих передач є актуальним для всіх машинобудівних підприємств.

Викладене, приводить до необхідності дослідження існуючих технологій для розв'язку проблеми підвищення працездатності, збільшення терміну служби, зносостійкості робочих поверхонь зубів великомодульних зубчастих

коліс. Перспективним напрямком на цьому шляху представляється зміцнююча термічна обробка робочої поверхні концентрованим потоком енергії [17]. Структури зміцненого типу, що утворюються при швидкісному нагріванні й охолодженні мають високу твердість, зносостійкість, опір до руйнування.

Зношування зубів є основним видом руйнування зубів відкритих передач. Запиленість робочої зони ставить відкриті зубчасті передачі в досить несприятливі умови роботи. Пил, що має велику кількість твердих абразивних часток, попадає на робочі поверхні зубів, змішується з мастилом і викликає їх інтенсивне зношування (рис. 1.2).

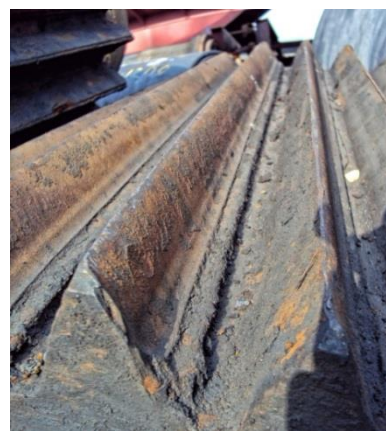


Рис. 1.2. Зношення евольвентного профілю вал-шестірні приводу кульового млина МШЦ 40х50

Викривлення профілю зуба в результаті зношування приводить до зменшення радіусів кривизни, що веде до прискореного розвитку викрашування й появи заїдання робочих поверхонь. Результати експериментів показали, що зміна евольвентного профілю зубів через зношування значно впливає на динамічні навантаження в зачепленні й довговічність зубчастих передач [18,19].

Неминучі неточності монтажу великих зубчастих передач, деформації їх елементів і опор під дією зовнішніх робочих навантажень обумовлюють нерівномірне навантаження зубів і ведуть до інтенсивного зношування відкритих зубчастих передач.

Механізм зношування по І.В. Крагельському являє собою процес механічного руйнування, ускладненого фізико-хімічними змінами поверхневих

шарів матеріалу. Руйнування поверхонь контактуючих деталей відбувається внаслідок наявності нерівностей на поверхнях тертя, що викликає виникнення напруги і деформації в зоні контакту. Число навантажень, необхідних для руйнування, залежить від вихідної міцності матеріалу, його втомного опору й умов навантаження. При цьому спостерігається найбільш інтенсивні види зношування: абразивний, що є результатом зрізання й пластичного деформування мікронерівностей твердими сторонніми частками при відносному переміщенні спряжених поверхонь, і когезійний, за рахунок явищ схоплювання, коли сили тертя досягають межі міцності матеріалу контактної пари.

Зносостійкість деталей є кількісною характеристикою їх здатності чинити опір зношуванню в певних умовах зовнішнього впливу. Динаміка зношування контактної поверхні деталі показано на рисунку 1.3, де крива зношування представлена в координатах зношення (W) – час роботи деталі (T). Ділянка a характеризується відносно великою швидкістю зношування, відповідає періоду приробляння $T_{\text{пр}}$. Ділянка b , з невеликою постійною швидкістю зношування, характеризує нормальний період зношування $T_{\text{зн}}$, а ділянка $в$ характеризує період аварійного зношування $T_{\text{ав}}$.

Незалежно від виду в основі будь-якого зношування лежать процеси пластичної деформації, зміцнення, виникнення металевих зв'язків і руйнування їх, адсорбції, дифузії й утворення хімічних сполук, нагріву й зміни властивостей металів у результаті теплових явищ, різання й втомних явищ [20].

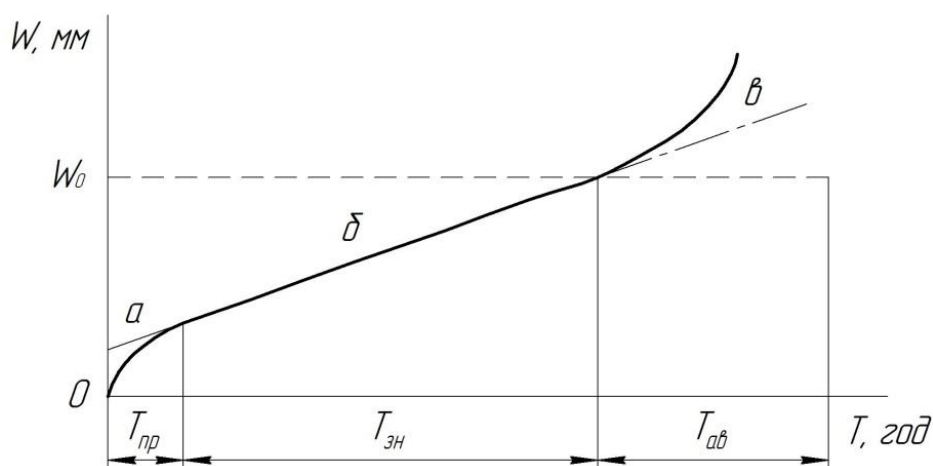


Рис.1.3. Крива зношування

Явище втоми, одним із перших досліджував І.В. Крагельський зі співробітниками [21]. Вони виявили, що циклічний вплив твердим виступом на поверхню обертового циліндричного зразка після певного числа циклів викликає лавиноподібне диспергування матеріалу поверхневого шару. Було висловлене припущення, що руйнування поверхневого шару настає в результаті впливу на матеріал знакозмінних пружних деформацій, які залежно від величини можуть викликати розвиток багато або малоциклової втоми. При цьому на процес втомного зношування найбільший вплив виявляє пластична деформація, що відбувається при терті на вершинах виступів шорсткостей [22].

Аналіз втомного характеру механічних і корозійно-механічних видів зношування важконавантажених вузлів тертя наведені в роботах [23 – 26]. У ході проведення досліджень автори визначили, що втомні тріщини, що призводять до викрашування зубів шестірень, розвиваються не з глибини, а з поверхневого шару. При наявності рідкого змащення на контактуючих поверхнях у тріщину проникає мастило й при відносному переміщенні тертьових деталей відкритий кінець тріщини закривається, виникає високий тиск, розклинюючий тріщину. Із часом при наступних навантаженнях тріщина поглиблюється й сколює з поверхні частки матеріалу, утворюючи ямки (пітинги).

При терті коченні втомний (віспавидний) знос може супроводжуватись окисним зношуванням [24]. При окисному зношуванні одночасно відбуваються два взаємозалежні процеси: мікропластична деформація в поверхневих шарах і дифузія кисню в пластично деформований метал.

Однієї з основних причин недовговічності важконавантажених вузлів тертя є інтенсивне абразивне зношування деталей [27]. Процес зношування матеріалів при терті об абразивну поверхню представлено в цих роботах як дряпання металу безліччю твердих зерен, більша частина яких залишає пластично видавлені сліди, а менша частина зерен зі сприятливо розташованими гранями знімає стружку. У результаті, як показано в роботі [28] зношування поверхні металів абразивними частками відбувається шляхом зрізу,

відриву, втомного руйнування при порушенні фрикційних контактів у пружній області й багаторазового передеформування (перенаклепу).

Для подібних умов навантаження Г.М. Сорокін [29-31] вважає, що міцнісні характеристики сталі є не тільки комплексним показником її механічних властивостей, але й одночасно визначають здатність деталей чинити опір абразивному зношуванню й руйнуванню при тривалому навантаженні.

У важконавантажених передачах забезпечення якісного контакту зубів є важливим завданням, тому що від нього залежить несуча здатність передачі й надійність її роботи. Поломка зубів і контактні руйнування зубчастих коліс у більшості випадків виникають внаслідок концентрації навантаження, основною причиною якої є неправильно обраний вихідний контакт зубів при виготовленні й складанні передачі [32]. Неприпустимі форми контакту зубів передачі показано на рисунку 1.4.

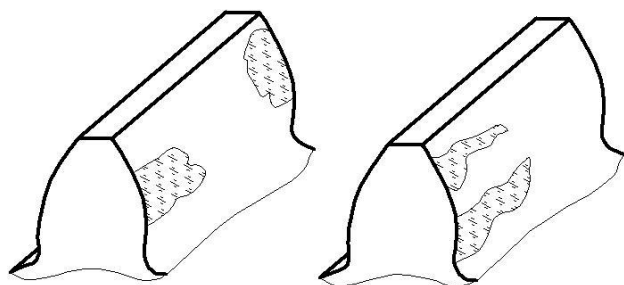


Рис. 1.4. Неприпустимі форми контакту зубів і поломка зубів

Також на працездатність зубчастих коліс, на думку Ю.М. Лахтіна [33], істотний вплив може виявити хіміко-термічна обробка (ХТО), зокрема, цементация, яка сприяє підвищенню границі витривалості самих зубів. У цьому випадку в процесі ХТО поліпшуються фізико-механічні властивості поверхневих шарів зубів, тобто тут виникають залишкові стискаючі напруги, збільшується твердість і стабілізується структурний стан зміцненого шару. Однак наступне фінішне шліфування всього профілю зуба приводить до

зменшення стискаючих напруг, тобто зниженню межі міцності при вигині, тому що частина загартованого цементованого шару знімається [34].

Таким чином, аналіз пошкоджуваності зубчастих коліс, експлуатованих при нестационарному тепловому й механічному навантаженні, дозволяє зробити припущення, що передчасний їх вихід з ладу обумовлений головним чином процесами в поверхневих шарах. В роботах [35, 36] наведені приклади, що демонструють вплив стану поверхні на міцнісні властивості матеріалів, і відзначається специфіка будови поверхневих шарів, у яких є присутнім безліч різних дефектів (об'ємних і структурних), що підвищують рівень поверхневої енергії. Низька напруга зрушення, мала величина енергії активації й великий активаційний обсяг, висока рухливість поверхневих дислокацій приводять до того, що під дією прикладених напруг пластична деформація починає відбуватися спочатку в поверхневих шарах матеріалу.

Відзначені особливості висувають нові вимоги до якості поверхневих шарів зубчастих коліс. Застосування сталей і сплавів тільки з об'ємним зміцненням при контактному динамічному навантаженні проблему довговічності розв'язати не може. Виходом з даної ситуації є комплексний підхід, при якому розробка нових більш стійких матеріалів іде разом зі створенням ефективних методів їх поверхневого зміцнення.

Застосовані марки сталі й процеси їх термічної обробки повинні забезпечити максимальну контактну, втомну й згинальну міцність, зносостійкість поверхневого шару в комбінації з більш пластичною серцевиною [37, 38].

Контактна витривалість поверхневого шару характеризується здатністю матеріалу протистояти розвитку викрашування на робочій поверхні, що сприймає змінні контактні навантаження, і визначається конструктивними й технологічними факторами. Технологічне забезпечення контактної витривалості в значній мірі пов'язане з формуванням у тонких ($5\div 15$ мкм) поверхневих шарах оптимальної структури. Зміцнюючі технології, формують

структуру поверхневого шару, створюють основний рівень зміцнення зубів коліс, що визначає їх працездатність.

Слід зазначити, що згинна й контактна міцність, протизадирна стійкість, а також зносостійкість є основними критеріями надійності зубчастих передач, на які можуть впливати різноманітні фактори [39-41]. Сумарно даний вплив представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Вплив різних факторів на критерії надійності зубчастих передач

Критерії надійності Фактор	Міцність і витривалість при вигині	Контактна витривалість	Протизадирна стійкість	Зносостійкість
Збільшення модуля колеса: m	Значно підвищує	Знижує		Знижує
Збільшення відносної ширини вінця: b/m	Знижує			
Збільшення критерію міцності: σ_H, ψ_K	Значно підвищує			Значно підвищує
Збільшення твердості поверхні				Підвищує
Збільшення величини плями контакту	Підвищує			
Збільшення шорсткості поверхні	Знижує	Знижує	Знижує	Значно знижує
Збільшення нерівномірності розподілу навантаження по ширині		Значно знижує	Значно знижує	Знижує
Застосування змащення й присадок	Не впливає	Значно підвищує		Підвищує
Збільшення окружної швидкості колеса	Знижує	Підвищує	Значно знижує	Підвищує

Очевидно, що для підвищення міцності на вигин при незмінному діаметрі колеса необхідно збільшувати модуль, однак при цьому знижується контактна витривалість і протизадирна стійкість. Зі збільшенням відносної ширини вінця b/m – знижується опір зубів усім видам руйнування. Зі збільшенням показника «критерій міцності», а також у випадку застосування поверхневого зміцнення опір зубів усім видам руйнування значно підвищується. У той же час збільшення нерівномірності розподілу

навантаження по ширині зуба й наявність абразивних часток у змащенні цей вплив зміцнення послабляє, особливо в умовах заїдання й інтенсивного зношування. У свою чергу, збільшення окружної швидкості призводить до зниження границі витривалості зубів на вигин і протизадирній стійкості, однак, у цьому випадку підвищується опір втомному викрашуванню й зношуванню. Особливий вплив на всі показники працездатності зубів здійснюють чистота поверхні й площа спряження контактних поверхонь.

Відповідно до вищевикладеного обґрунтовано, що в реальних умовах експлуатації при наявності різних контактних взаємодій особливе значення набувають поверхневі явища. Тому, значно підвищити надійність зубчастих коліс можуть поверхневі ефекти як конструктивного (чистота поверхні, величина плями контакту), так і технологічного (поверхневе зміцнення) характеру. Конструктивні показники досить відомі й широко використовуються в техніці, внаслідок цього запас довговічності слід шукати в розробці й застосуванні різних способів поверхневого зміцнення.

1.2. Аналіз методів і технологій поверхневого зміцнення

Як відзначалося вище, зубчасті колеса виходять з ладу внаслідок руйнування поверхонь тертя, тому доцільно піддавати зміцненню лише поверхневі шари металу, зберігаючи при цьому високу пластичність і в'язкість серцевини деталі. Зазначені різні вимоги до поверхневого шару й поперечному перерізу можна задовольнити завдяки спрямованим способам обробки поверхневих шарів з метою встановлення там специфічних властивостей. При цьому як при утворенні в поверхневому шарі мартенситу, так і при дифундуванні в решітку поверхневого шару елемента, наприклад азоту, у ньому відбувається збільшення обсягу. Тому в цих областях створюються напруги стиску, які несуть із собою підвищення межі втоми. Підвищення міцності робочих поверхонь деталей при збереженні відносної пластичності їх серцевини досягається шляхом локальної термічної обробки або ХТО.

Змінюючи температуру нагрівання (або охолодження), витримку при цій температурі й швидкість наступного охолодження, можна або наблизитися до рівноважного структурного стану, або зафіксувати відповідні метастабільні нерівновагі структури, що володіють особливими властивостями. При зміцненні як нелегованих, так і легованих сталей утворюється мартенсит – пересичений твердий розчин вуглецю в α -залізі, що володіє високою твердістю й міцністю.

Існують різні способи поверхневого зміцнення, що відрізняються способом нагрівання, охолодження й розподілом температури в оброблюваному шарі, такі як газополум'яна, індукційна [42] або імпульсна [43]. Без охолодження гартівним середовищем працюють при імпульсному гартуванні, коли дуже тонкі шари поверхні доводять до температури аустенізації шляхом енергетичних імпульсів протягом мілісекунд, тому зміцнення відбувається шляхом відводу тепла через навколишній матеріал. Для подачі енергії для короткочасного нагрівання застосовуються електронні й лазерні промені.

Лазерне гартування засноване на швидкому нагріванні зони обробки вище температури фазового переходу і наступному охолодженні за рахунок тепловідведення у внутрішні обсяги матеріалу. У результаті в поверхневому шарі утворюється специфічна високодисперсна структура, яка має мікротвердість, що в 2-4 рази перевищує твердість основи. Вплив лазерного випромінювання на поверхню дозволяє отримати глибину зміцнення до 1,5 мм при ширині одиничних смуг 2-15 мм.

Переваги: можливість обробки у важкодоступних місцях; мінімальне нагрівання деталей; відсутність жолоблення; здійснення процесу без підігріву деталі; обробку окремих ділянок можна проводити і після збірки конструкції або вузла; відсутність шкідливих відходів. Головними недоліками цього методу є: висока складність та вартість обладнання, низький ККД лазерів.

Технологія індукційного гартування з нагріванням струмами високої частоти (СВЧ) була запропонована В.П. Вологдіним у 1935 році, а дослідження,

проведені І.Н. Кидіним [44] і К.З. Шепеляковським [42], дозволили використовувати цей метод стосовно до різноманітного асортиментів виробів. Сутність методу полягає у швидкісному нагріванні зовнішніх шарів деталей вище температур фазових перетворень і наступному охолодженні металу зі швидкістю вище критичної, у результаті чого метал здобуває структуру дрібногільчастого мартенситу. Як відомо, щільність індукційного змінного струму по перетину провідника неоднакова й при високих частотах можна вважати, що струм практично йде лише в тонкому поверхневому шарі. Великий вплив на якість зміцнення при даному методі оказує режим охолодження, який повинен забезпечити насамперед необхідну глибину прокалюваності. З іншого боку, режим охолодження повинен бути таким, щоб внутрішні напруження, що виникають у процесі поверхневого гартування, не стали причиною виникнення тріщин [45]. Для забезпечення рівномірності охолодження при індукційному електронагріві в основному застосовується спреєрний спосіб охолодження із застосуванням різноманітних гартівних середовищ.

Як було відзначено, від оптимального поєднання міцності поверхневого шару й в'язкості серцевини залежить працездатність деталі. При недостатній товщині зміцненого поверхневого шару можливо його продавлювання вглиб внаслідок більших контактних напруг, а зайвий товстий шар може привести до крихкого руйнування поверхні деталі. Застосовуючи поверхневе зміцнення з індукційним нагрівом, як підкреслюється в роботі [46], можна одержати поверхневий шар заданої глибини й конфігурації, що дозволяє використовувати цей метод для великомодульних зубчастих коліс і шестірень. Але при застосуванні даного методу є ряд недоліків: необхідність спеціалізованого обладнання - генератори СВЧ і пристосувань - індукторів, які є індивідуальними для кожного виду деталі; підвищена складність обладнання, необхідний кваліфікований персонал для настройки і ремонту; при поганому узгодженні індуктора з заготовкою потрібна велика потужність на нагрів.

Електронно-променева обробка здійснюється в вакуумі при наявності спеціального обладнання: технологічної камери з вакуумною системою та

електронної гармати з високовольтним джерелом живлення. Електронно-променева обробка заснована на використанні енергії потоку спрямованих електронів для формування поверхонь деталей шляхом нагрівання, плавлення і випаровування матеріалу в зоні обробки. Для обробки матеріалів електронним променем використовують спеціальні установки, в яких формуються потужні направлені пучки електронів. Недоліками даної обробки є: складність технологічних установок, високу їх вартість і необхідність проведення робіт в умовах глибокого вакууму; неминуча поява жорсткого рентгенівського випромінювання вимагає спеціальних засобів захисту та дотримання суворих заходів безпеки.

Останнім часом, у технології виробництва деталей машин усе більш широке застосування одержують процеси поверхневого зміцнення із застосуванням висококонцентрованих джерел нагрівання (ВКДН). Сутність їх полягає в термічних фазових і структурних перетвореннях, що відбуваються при швидкому концентрованому нагріванні робочої поверхні деталі плазмовим струменем (дугою) і тепловідводі в матеріал деталі.

Основною фізичною характеристикою поверхневого зміцнення ВКДН є температурне поле. Ця характеристика дозволяє визначити температуру матеріалу в будь-якій точці зони термічного впливу (ЗТВ) у різні моменти часу, швидкість нагрівання й охолодження, тривалість перебування розігрітого металу ЗТВ у заданому інтервалі температур залежно від параметрів режиму обробки й теплофізичних характеристик матеріалу.

Основною відмінною рисою методів поверхневого зміцнення ВКДН є можливість одержання швидкостей нагрівання й охолодження матеріалів, на кілька порядків перевищуючих значення, характерні для традиційних методів зміцнення (пічного гартування, гартування СВЧ, газополум'яного гартування й інших), що сприяє одержанню зміцнених шарів з недосяжним раніше рівнем експлуатаційних властивостей.

Переваги ВКДН: зміцнення тільки поверхневого шару, а серцевина залишається в'язкою; спостерігається висока твердість і зносостійкість

поверхні; відсутні або мінімальні деформації зміцнених деталей; висока продуктивність – $2-9 \text{ м}^2/\text{год}$; можна використовувати як фінішну операцію; наявність у поверхневому шарі стискаючих напруг і великої кількості залишкового аустеніту підвищує опірність зародженню й поширенню тріщин; зміцнення проводиться в більшості випадків без примусового охолодження.

У процесі численних досліджень встановлено, що швидкість охолодження поверхневого шару металу, структура й властивості зміцненої зони визначаються в першу чергу ступенем локалізації введення тепла в оброблюваний виріб (у пляму нагріву). Від цього залежать і такі важливі для практики фактори, як величина залишкових напруг і деформацій, необхідність застосування додаткових охолоджуючих середовищ, продуктивність обробки, техніко-економічні показники. У загальному випадку порядок величини швидкості охолодження ($^{\circ}\text{C}/\text{с}$) практично відповідає порядку величини концентрації теплової потужності ($\text{Вт}/\text{см}^2$) джерела. Основні характеристики локальних джерел нагріву для поверхневого зміцнення наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Основні техніко-економічні характеристики джерел нагріву [73]

Джерело нагріву	Потужність, Вт		Щільність потужності, $\text{Вт}/\text{см}^2$		Ефективний ККД нагріву
	min	max	min	max	
Газове полум'я	10^2	10^4	$2 \cdot 10^2$	$6 \cdot 10^2$	0,55
Електрична дуга	50	$2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^4$	0,75
Плазмовий струмінь	10^3	10^5	$5 \cdot 10^2$	10^5	0,80
Промінь:					
• іонний	10	10^3	10^2	10^5	0,85
• електронний	10	10^5	$5 \cdot 10^2$	10^7	0,85
• лазерний	10	$2,5 \cdot 10^5$	10^2	10^{10}	0,05

Порівняння твердості та глибини, що можливо отримати такими методами поверхневого зміцнення, як гартування СВЧ, цементация, азотування, іонне азотування наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

**Порівняння методів поверхневого зміцнення по твердості
поверхневого шару й по глибині зміцнення**

Вид поверхневого зміцнення	Загартування СВЧ	Цементация	Азотування	Іонне азотування	Обробка електричною дугою	Лазерне зміцнення	Плазмове зміцнення
Товщина поверхневого шару h , мм	до 10	до 2	до 0,6	до 0,35	до 5	до 1,5	до 5
Твердість поверхневого шару, HRC	56-60	58-63	56-66	56-70	35-50	55-65	55-65

Однак тут необхідно враховувати, що технології поверхневого зміцнення мають свої специфічні особливості і їх результативність залежить від обліку різноманітних факторів, що відображують як саму деталь, її хімічний склад, габарити, геометричну форму, вихідний стан поверхні, так і передбачувані умови експлуатації по всьому комплексу зовнішніх факторів. Тому вибір технології зміцнення зокрема зубчастих коліс, не може носити універсальний характер, а повинен бути адаптований для конкретного типорозміру коліс у машинах і агрегатах. Усе це вимагає індивідуального підходу як у розробці технології зміцнення, так і методів оцінки пошкоджуваності при прискорених випробуваннях.

1.3. Сучасний стан теорії та практики використання плазмово-дугового нагрівання для термічної обробки металів і сплавів

Перші відомості про дослідження плазмового нагрівання для поверхневого зміцнення відносяться до середини й кінцю 70-х років [47, 48], а найбільше число публікацій, присвячених цьому питанню - до наступного десятиліття. Слід зазначити, що незважаючи на досить складну економічну ситуацію й зменшення загального числа технічних публікацій інтерес до цієї

проблеми не слабшає, про що свідчать роботи Лещинського Л.К., Самотугіна С.С., Короткова В. А., Бердникова А.А., Токмакова В.П. і ін. Однак, переважна більшість досліджень присвячена нагріванню плазмовим струменем (плазмотронами непрямої дії), ефективність використання яких набагато відстає від нагрівання плазмовою дугою (плазмотронами прямої дії) [49].

У роботі С.С. Самотугіна [50] наведені дані про нагрівання без оплавлення сталі 9ХФ плазмовим струменем повною тепловою потужністю 32кВт (питома тепла потужність $q = 1.14 \cdot 10^9$ Вт/м²) при лінійній швидкості переміщення плазмотрона 25-35 м/год (близько 1 см/с). При аналогічних енергетичних показниках нагрівання сталі без оплавлення поверхні плазмовою дугою на створеній нами дослідно-експериментальній установці [51] досягається при лінійній швидкості руху плазмотрона більше ніж на порядок вище зазначеної. Настільки значна розбіжність пояснюється не тільки перевагами плазмово-дугового нагрівання, але й не врахуванням практично всіма дослідниками ефективного ККД нагрівання при розрахунках параметра питомої теплової потужності. Наявні в літературі [52] відомості про ефективний ККД нагрівання (80%) для плазмового струменя навряд чи можна вважати достовірними, а наведене в роботі [50] значення (45%) представляються більш правдоподібним. З наведеного прикладу випливає висновок про необхідність оцінки ефективного ККД нагрівання конкретного теплового джерела.

У роботі [53] в якості основного (і єдиного) параметру плазмового нагрівання запропоновано використовувати питому теплову енергію плазмової дуги в плямі нагрівання. Така постановка питання викликає заперечення, оскільки сама по собі величина питомої енергії без обліку тимчасового фактора ніяк не може однозначно визначити ні температури, ні швидкостей нагрівання поверхневого шару виробу, отже немає результатів зміцнення.

В інших роботах [54, 55] у якості параметрів нагрівання концентрованими джерелами енергії (КДЕ) (лазерного) пропонувалося ввести розмірні постійні, що залежать від теплофізичних властивостей матеріалу, який нагрівається, і

енергетичних характеристик джерела, які по суті є добуванням з розв'язку рівняння теплопровідності для випадку одновимірної моделі нагрівання однорідного напівнескінченного тіла. Доцільність такого підходу навряд чи виправдана, тому що введені постійні не несуть певного фізичного змісту, а тому важкі для сприйняття й не сприяють полегшенню вибору реальних технологічних параметрів обробки.

Успіх вибору параметрів плазменно-дугового нагрівання безпосередньо пов'язаний з теплофізичним аналізом цього процесу. Створення його адекватної фізичної моделі й розв'язок рівняння теплопровідності з обліком початкових і граничних умов з наступними розрахунками розподілу температурних полів по перетину тіла, що нагрівається та оцінки швидкостей нагрівання дозволить, з однієї сторони обґрунтовано прогнозувати умови при формуванні структури аустеніту, а з іншої - об'єктивно судити про те, які характеристики джерела та тіла, що нагрівається, визначають результати зміцнення. Спроби такого аналізу здійснювались в процесі вивчення плазмового нагрівання в ряді робіт. Досліджували [56] еволюцію температурних полів при плазмовій обробці порожньої циліндричної деталі. Авторами виконані розрахунки й експериментальна перевірка розподілу температури при термоциклічному нагріванні плазмовим струменем обертової деталі. Показано, що запропонована залежність задовільно описує зміну температури, швидкостей нагрівання й охолодження поверхневих шарів деталі в процесі термообробки. Дослідження виконане для закону нормального розподілу питомої потужності теплового потоку в плазмовому струмені. У якості основних технологічних параметрів обробки автори використовують швидкість переміщення плазмотрона, частоту обертання деталі, а також умови зовнішнього охолодження.

В іншій аналогічній по темі роботі [57] зроблено математичне моделювання процесу термічної обробки сталі з використанням плазмотрона з дугою незалежною від виробу й експериментальна перевірка результатів розрахунків. Розміри зони зміцнення аналізували по термодинамічним діаграмам розпаду переохолодженого аустеніту. Хоча розрахунки виконані для

випадку нагрівання плазмотроном непрямої дії методично автори коректно підійшли до вибору головної характеристики теплового джерела - величині й закону розподілу теплового потоку плазмового струменя по плямі нагрівання.

Є відомості [58, 59] про комп'ютерне моделювання процесу нагрівання плазмовим струменем. Отримане рівняння для розрахунків максимальних температур поблизу поверхні матеріалу й побудовані тривимірні діаграми, що зв'язують потужність струменя, швидкість її переміщення й глибину загартованого шару. В іншій роботі [60] повідомляється про створення чисельної моделі плазмового струменя. Автори перерахованих досліджень [58-60] впритул наблизилися до правильного розуміння основних технологічних параметрів плазмової обробки: питомої потужності й часу впливу теплового джерела, яке в окремому випадку застосування джерела безперервної дії, що рухається, визначається швидкістю його руху в межах плями нагрівання. Незважаючи на те, що в цих роботах розглядається джерело нагрівання з низькою ефективністю (плазмотрон непрямої дії) з методичної точки зору теплофізичний аналіз нагрівання виконаний правильно, а його основні положення носять універсальний характер, і можуть бути використані для інших джерел КДЕ з обліком їх індивідуальних особливостей.

Найбільш близькою за цією темою є робота [61], присвячена аналізу теплофізичних явищ при нагріванні під гартування скануючою дугою. У статті справедливо відзначається висока ефективність прямої дуги, як джерела нагрівання, а також експериментально виявлене, що сканування дуги дозволяє суттєво збільшити товщину зміцненого шару без оплавлення поверхні. Однак у цьому дослідженні відсутня чіткість у розумінні головних параметрів процесу плазмового нагрівання. В експериментальній частині в якості параметрів процесу розглядаються струм дуги, швидкість її переміщення у взаємозв'язку із шириною й глибиною зміцненого шару.

Повідомляється також про застосування установки для плазмово-дугової термообробки, керованої за допомогою комп'ютера [62], розробленої в

китайському технологічному університеті. Затверджують, що в сталях 45 і 40Х, за допомогою плазмової дуги, вдається підвищити твердість більш 65 HRC,

Таким чином, існує очевидний недолік у засобах технічного забезпечення плазмово-дугового зміцнення металів і сплавів. Через складність процесів, що протікають у плазмовій дузі [63] і їх недостатньої вивченості, створення плазмових генераторів можливо лише за допомогою загальних рекомендацій [49, 64], заснованих на досвіді експлуатації цих пристроїв. Такі рекомендації стосуються в основному плазмотронів для плазмового різання, наплавлення й напилювання. Досвід створення спеціальних плазмотронів для регламентованого нагрівання під зміцнення й тим більше зі скануванням дуги в цей час відсутні.

Цікаве дослідження почате Ісхаковою Г.О. і Рахімяновим Х.М. [65] з оцінки мікроструктури, мікротвердості, а також міцністних і пластичних властивостей сталі 45 після плазмової аргоно- дугової обробки. На жаль, для оцінки механічних властивостей автори використовували непрямий метод і судили про них по вдавненню індентору.

Досліджували вплив аргоно-дугового нагрівання на структуру й властивості білого чавуну [66]. Судячи з опису, у цій роботі вперше застосована котушка індуктивності з магнітопроводом для регулювання щільності теплового потоку (конструкція не приводиться), що надходить у зразок. У даній роботі також не вивчали структурну організацію в межах зони термовпливу й тому дійшли висновку про ідентичність мікроструктури цієї зони з аналогічними зонами після нагрівання іншими КДЕ (лазер, індукційний і т.д.).

Аналогічну роботу провели в Болгарії на чавунах, з метою одержання поверхневого вибілу [67]. Експеримент проводили на чавуні із пластинчастим і сфероїдальним графітом плазмовою дугою питомою потужністю в 2,5-10 Вт/м, плазмоутворююче середовище - аргон. Плазмовим оплавленням на цих чавунах можна одержувати вибілений шар глибиною до 1,5мм, твердістю 580-600 HV і структурою, що характеризується великою неомогенністю, яка складається із квазіледебуриту, цементиту, карбідів, мартенситу, залишкового аустеніту,

бейніту, сорбіту, графіту в різних співвідношеннях і кількостях залежно від виду чавуну й режимів обробки.

У роботах [68, 69] вивчали структуру й в'язкість руйнування високоміцного чавуну й інструментальних сталей 9ХФ і Р6М5 після плазмового зміцнення концентрованим плазмовим струменем. Основні висновки, до яких приходять автори - це доцільність попередньої об'ємної термообробки перед плазмовим зміцненням, або проведення фінішної об'ємної відпуску після об'ємного зміцнення й плазмової обробки.

Структуру, мікротвердість і фазовий склад вуглецевих сталей 20, 45 і У10 визначали після впливу аргонової плазмової дуги прямої дії, що генерувалась плазмотроном з вихровою стабілізацією. Загартування сталей проводили без оплавлення [70] і з оплавленням поверхні [71] від вихідної структури сталей у відпаленому стані. Було встановлено, що у всіх сталях після гартування зберігається вихідна хімічна мікронеоднорідність, у ділянках перліту утворюється спочатку аустеніт приблизно евтектоїдного вмісту, а при охолодженні він перетворюється в «безструктурний» мартенсит. При збільшенні вмісту вуглецю в доевтектоїдній сталі глибина шару з переважно однорідною мартенситною структурою збільшувалася з 120-150 мкм для сталі 20, до 400 мкм у сталі 45 і одночасно росла мікротвердість із 5 ГПа до 7-8 ГПа.

Резюмуючи результати вивчення структуроутворення при плазмово - дуговому нагріванні можна констатувати наступне. По різних причинах структурний стан сталей після плазменно-дугового нагрівання однозначно ідентифіковано не було. В окремих випадках авторам перешкодив помилковий підхід у виборі основних параметрів процесу обробки. В інших - були використані малі збільшення при дослідженні мікроструктури, що не дозволяє розпізнати тонкощі топографії зміцнених шарів. Іноді, у силу інерційності мислення, дослідники апріорно вважали процес структуроутворення ідентичним незалежно від природи КДЕ.

Досліджували вплив плазмово-дугового зміцнення сталей ШХ15СГ, У10А, 35ХГСА на їх деякі фізичні, механічні й експлуатаційні властивості [72].

Виявлено, що при накладенні двох сусідніх загартованих смуг твердість на їхній границі знижується за рахунок відпуску при повторному нагріванні. У сталі ШХ15СГ після плазмового зміцнення присутні дві зони: на поверхні – великогільчастий мартенсит й залишковий аустеніт й далі, на глибин більш 0,2 мм мартенсит, тростит, а ближче до серцевини дрібнодисперсний перліт й карбіди, що не розчинились. Характер зміни мікроструктури по товщині загартованого шару сталі У10А близький до описаного, для сталі ШХ15СГ і складається на поверхні з великих голок мартенситу із залишковим аустенітом і далі з дрібногільчастого мартенситу з переходом до троститної структури. Аналогічні зони формуються й у сталі 35ХГСА. Твердість сталі У10А після плазмового зміцнення вище, чим сталей ШХ15СГ і 35ХГСА: у центрі загартованих смуг вона становила HRA 84,5; 83,5; 79,5 відповідно. Рентгенівським методом визначали залишкові напруги в загартованих шарах. На поверхні сталі ШХ15СГ спостерігалися значні стискаючі напруги (до 1320 МПа), що набагато вище, чим після наклепу дробом, гартування СВЧ і азотування. У всіх випадках глибина гартування без оплавлення поверхні становила 0,7-1,5мм і охолодження відбувалося за рахунок теплопередачі в глибинні шари металу.

У роботах [73, 74] представлені результати вивчення мікроструктури й характеристик в'язкості руйнування вуглецевих сталей з вмістом 0,3-1,5% вуглецю після обробки плазмовим струменем. Відзначають, що в мікроструктурі зміцненого шару зафіксовано два шари: поверхневий, що слабо травиться зі структурою дрібнодисперсного мартенситу твердістю 800-1100HV і другий - з перехідною структурою від загартованого шару до вихідної будови сталі. Зміцнений шар, володіючи високою зносостійкістю, як відомо, може служити вогнищем руйнування всього виробу, тому при плазмовій обробці, що приводить до набагато більшої глибини зміцнення, чим лазерна або електронно-променева, оцінка тріщиностійкості ще більш актуальна. Для цього проводилися випробування зразків на ударний вигин з осцилографуванням процесу руйнування.

Плазмове зміцнення свердел зі сталі Р6М5 проводили за допомогою плазмотрона непрямої дії, що працює на азоті [75]. Джерелом живлення служив блок серійної установки АПР-403, а для збільшення швидкості охолодження застосовували спрейерне охолодження водою. Одержали зміцнений шар глибиною 1-1,5мм, який умовно можна було розділити на дві зони: поверхневий «білий» шар глибиною приблизно 0,4мм, мікротвердістю 12ГПа й, який слідує за ним, шар аустенітно - мартенситної структури мікротвердістю 9,7-8,5ГПа. Структура зміцненого шару відрізнялася високою дисперсністю й виявилася більш теплостійкою, чим після стандартного для цієї сталі загартування. При стійкістних випробуваннях плазмово-зміцнені свердла показали кращі результати за часом наробітку до появи певного рівня зношування, у порівнянні із серійними.

Певний внесок у розуміння фізичних процесів, що протікають при плазмовій обробці, можуть внести результати дослідження лазерно - плазмової обробки [76, 77].

Проведений аналіз показує перспективи плазмового нагрівання, але немає відомостей і розробок, які можна застосувати до великомодульних зубчастих передач.

Характер зміни експлуатаційних характеристик при плазмовому зміцненні поряд з фазовими й структурними перетвореннями обумовлений також реалізацією певних механізмів зміцнення при їхньому взаємозв'язку. Відомо, що в результаті загартування відбувається комплексне зміцнення матеріалу, обумовлене впливом дефектів тонкої кристалічної структури, мартенситними перетвореннями й включеннями дисперсної фази [73, 78]. Стосовно до плазмового зміцнення вплив різних механізмів структурного й субструктурного зміцнення на експлуатаційні характеристики великомодульних зубчастих передач поки не вивчено, що підтверджує актуальність подальших досліджень.

Широке промислове застосування більшості відомих способів зміцнювальної обробки концентрованим потоком енергії стримується високою

вартістю й складністю обладнання, його недостатньою надійністю й продуктивністю, необхідністю використання вакууму, спеціальних приміщень із особливими вимогами, потребою у кваліфікованому обслуговуванні, високими експлуатаційними витратами. У цих умовах, для збільшення експлуатаційного ресурсу швидкозношуваних деталей раціональним за параметрами універсальності, доступності, екологічності й економічної ефективності представляється спосіб поверхневої термообробки плазмовою дугою [17, 79, 80]. Не змінюючи параметрів шорсткості поверхні, така термообробка легко вбудовується в технологічний процес підготовки й ремонту деталей, будучи фінішною операцією, маловитратна, досить продуктивна й дозволяє ефективно збільшити їх експлуатаційну стійкість. Внаслідок чого автором пропонується застосовувати поверхневе плазмово-дугове зміцнення (ППДЗ) профілю зубчастого колеса для підвищення контактної міцності робочих поверхонь зубів.

Метою плазмового зміцнення є підвищення експлуатаційного ресурсу деталей машин за рахунок зміцнення їх поверхневого шару (товщиною до декількох міліметрів) термічною обробкою плазмовою дугою при незмінному загальному хімічному складі матеріалу й збереженні у внутрішніх шарах первісних властивостей вихідного металу. Зміцнення є результатом високошвидкісного локального нагрівання плазмовою дугою поверхневого шару виробу до високих (вище A_{c3}) температур і швидке його охолодження зі надкритичною швидкістю в результаті тепловідводу в глибинні (внутрішні) шари матеріалу виробу. Структури зміцненого типу, що утворюються при швидкісному нагріванні й охолодженні мають високу твердість, зносостійкість і опір до руйнування. Ефект від плазмового зміцнення визначається підвищенням експлуатаційних властивостей деталі завдяки зміні фізико-механічних характеристик поверхневого шару, внаслідок утворення специфічної структури й фазового складу металу, а також одержання на поверхні залишкових напружень, що стискають.

Структурні перетворення в цілому відповідають перетворенням при об'ємному гартуванні, однак, високі швидкості нагрівання й охолодження викликають зміну співвідношень між структурними складовими, зміна їх морфології внаслідок підвищеної дефектності кристалічної будови (збільшення щільності дислокацій, подрібнювання блоків і ріст напруг у кристалічних ґратах) [17, 79].

Завдання полягає в тому, щоб створити спосіб термічної обробки (поверхневого зміцнення) шестірень, який може дозволити одержати змінну твердість по висоті зубів, що знижується в напрямку западини (рис. 1.5). Це дозволяє управляти процесом зношування зубів з метою підтримки сталості якісних показників зачеплення зубчастих коліс.

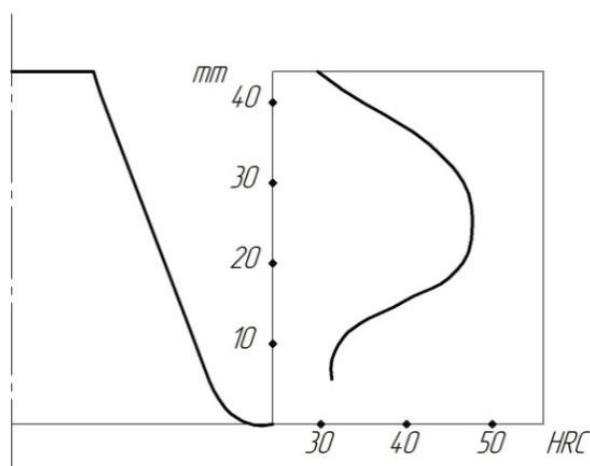


Рис. 1.5. Модель зміни твердості поверхневого шару зуба шестірни в результаті зміцнення

Інтерес дослідників до проблеми використання низькотемпературної плазми для термічної й хіміко-термічної обробки сталей і сплавів об'єктивно свідчить на користь цього КДЕ, що володіє очевидними перевагами в порівнянні з іншими різновидами.

Однак, незважаючи на значне число робіт у цій області, вона залишається недостатньо вивченою, що негативно позначається на темпах практичного використання плазмового зміцнення внаслідок декількох причин. По-перше, переважна більшість досліджень стосується плазмового джерела з низьким ККД, нагрівання - плазмовим струменем, близькому аналогу газополум'яної обробки, що відрізняється від останньої практично тільки температурою

газового потоку й інтенсивністю нагрівання. Із цього випливає, що необхідно сконцентрувати зусилля на вивченні плазмової дуги, як ефективного засобу впливу на структуру й властивості матеріалів.

Іншим раціональним напрямком зусиль слід вважати заміну дорогих інертних газів, водню й азоту таким доступним і, у той час, високоентальпійним плазмоутворюючим газом, як повітря. Попередні дослідження показали, що на таку заміну можна розраховувати, оскільки окисна дія повітря на поверхню нагрівання, як виявилось, не перевищує такого після традиційної термообробки із пічним нагріванням. Існуюче переконання про можливості застосування повітря винятково для плазмового різання не відповідає дійсності.

Ще однією проблемою застосування низькотемпературної плазми для поверхневого зміцнення є висока повна електрична потужність плазмової дуги й, як наслідок, створюваний нею питомої тепловий потік на поверхні нагрівання. Для порівняння слід підкреслити, що при обробці лазерним і електронно-променевим джерелом потужність серійних технологічних установок для їхньої реалізації обмежується 1-5 кВт, не тільки через технічну складність створення більш потужних пристроїв, але, більшою мірою, відсутністю зручних прийомів регулювання питомої потужності нагрівання. Висока питома потужність вимагає, збільшення швидкостей переміщення уздовж поверхні, що нагрівається, для запобігання її оплавлення й створення швидкісних транспортних пристроїв, швидкість протягання яких для рівня питомої потужності 10 Вт/м повинна становити кілька метрів у секунду. При таких швидкостях, мабуть, важко забезпечити рівномірність руху, від якого залежать результати зміцнення.

Представляється, що найбільш зручним способом розв'язку проблеми регулювання питомої потужності нагрівання є електромагнітне сканування плазмової дуги, за допомогою якого можна її повну електричну потужність розподілити на змінній площі плями нагрівання, що залежить від амплітуди сканування дуги, що регулюється величиною струму в обмотках

електромагнітної системи, що відхиляє. Така схема дозволила б направити всю потужність плазмової дуги на підвищення продуктивності зміцнення.

Таким чином, аналіз результатів попередніх досліджень свідчить про те, що низькотемпературна скануюча плазмова дуга (СПД) є новим перспективним тепловим джерелом, що представляє собою ефективний інструмент впливу на структурно-фазовий стан оброблюваного матеріалу.

Очевидним є те, що успішне використання СПД у цей час не можливо, оскільки не створені наукові основи обробки матеріалів цим методом. Відзначалося, що поки немає єдності поглядів більшості дослідників навіть на основні параметри обробки КДЕ й цей висновок у значній мірі ставиться до СПД, як до специфічного коливного високотемпературного теплового джерела. При цьому, поряд із встановленням і методикою визначення основних параметрів обробки СПД, залишається невідомим її ефективний ККД нагрівання і його ймовірна зміна від амплітуди сканування. Відсутній ряд концептуальних підходів до теплофізики нагрівання СПД, без виявлення яких не може бути розкрита картина фізичних явищ, що протікають у матеріалі при нагріванні й охолодженні.

Оскільки скануюча повітряно-плазмова дуга по суті дослідженню взагалі не піддавалась, то немає й технологічних основ зміцнення з нагріванням цим тепловим джерелом. Не створено рекомендацій зі стратегії пошуку технологічних режимів обробки СПД для одержання заданих результатів зміцнення.

Таким чином, метою виконаних досліджень є підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих передач шляхом поверхневого плазмово-дугового зміцнення.

Сформульована мета роботи обумовила необхідність розв'язання таких задач:

8 дослідження й визначення причин і характеру руйнувань зубчастих зачеплень приводів рудорозмельних млинів та обґрунтування можливості

підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих передач шляхом плазово-дугового зміцнення робочих поверхонь зубів;

9 розробка методики дослідження механізмів структурних перетворень у сталях при поверхневій плазово-дуговій обробці з метою вибору оптимальних режимів зміцнення великомодульних зубчастих передач, для одержання необхідної структури, фазового складу й твердості поверхневого шару;

10 дослідження впливу технологічних параметрів ППДЗ на зносостійкість і механізми зношування поверхневого шару та розробка методики визначення й оцінки ресурсу великомодульних зубчастих передач після ППДЗ;

11 оптимізація технологічних параметрів режиму поверхневого плазово-дугового зміцнення шляхом математичного моделювання з метою виявлення їх впливу на відносний термін експлуатації великомодульних зубчастих;

12 експериментальні дослідження процесу поверхневого плазово-дугового зміцнення, розробка та реалізація методики теплофізичних досліджень;

13 експериментальне дослідження довговічності зубчастих передач, що пройшли ППДЗ і їх розрахунки на довговічність за параметром зношення;

14 розробка й створення комплексу оригінального спеціалізованого обладнання для реалізації технологічної схеми плазово-дугового поверхневого зміцнення робочих поверхонь великомодульних зубчастих передач.

Висновки до розділу 1

1. Відкриті зубчасті великомодульні передачі знайшли широке застосування в гірничодобувній, гірничозбагачувальній і гірничо-металургійній промисловості, в трансмісіях і приводах повороту: екскаваторів, бурових верстатах, драглайнах, скреперах, бульдозерах, навантажувачах, грейферах, бульдозерах, грейдерах, а так само в перевантажувачах, роторних і барабанних млинах і інших видах обладнання. Встановлено, що визначення ресурсу роботи

таких передач і запобігання зупинки обладнання є актуальним і значимим завданням.

2. Розглянуті причини й характер руйнувань зубчастих зачеплень приводів рудорозмельних млинів, види ушкоджень елементів редукторів у практиці експлуатації на гірничозбагачувальних комбінатах регіону. Встановлено, що великомодульні важконавантажені зубчасті передачі не повністю забезпечують нормативний ресурс через передчасний вихід з ладу зубчастих елементів, що пов'язане з відсутністю зміцнюючих технологій стосовно до робочих поверхонь зубів.

3. Зроблений огляд сучасних методів і технологій підвищення надійності трансмісій гірничих машин. Вирішення проблем надійності вимагає використання всього арсеналу технологічних засобів з метою забезпечення високої якості робочих поверхонь, тому що саме поверхневий шар дуже впливає на їхні експлуатаційні характеристики.

4. Встановлено, що вибір технології зміцнення зокрема зубчастих коліс, не може носити універсальний характер, а повинен бути адаптований для конкретного типорозміру коліс у машинах і агрегатах. У наслідку чого для зміцнення робочих поверхонь великомодульних зубчастих передач приводів рудорозмельних млинів запропонований інноваційний метод плазмового зміцнення. Структура зміцненого шару, що виходить після плазмового нагрівання характеризується великою твердістю й високою дисперсністю, впливає на зміну експлуатаційних характеристик зміцнених матеріалів – зносостійкість, механічні властивості (міцність, пластичність, тріщиностійкість, витривалість), корозійну і теплостійкість.

5. Плазмова обробка має потенціал, який може забезпечити створення економічного й продуктивного методу поверхневого зміцнення. Однак реалізація такого методу стримується відсутністю науково обґрунтованої методики вибору параметрів ППДЗ робочих поверхонь деталей машин, у тому числі контактних поверхонь великомодульних зубчастих передач.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Методика проведення поверхневого плазмово-дугового зміцнення робочих поверхонь великомодульних зубчастих передач

Спеціалізоване технологічне обладнання для плазмової поверхневої обробки в цей час у промисловості України серійно не випускається. Однак установку для плазмової поверхневої обробки можна створити на базі існуючих установок для плазмового зварювання серії УПС, плазмового різання серії АПР, плазмового напилювання й наплавлення серій УПН, УПУ, «Київ-4», «Київ-7» та ін.

Очевидно, що на початку необхідно сформулювати вимоги, або критерії, яким повинно задовольняти джерело нагрівання в умовах даного способу обробки, а саме – зміцнення великомодульних шестірень:

- 1 – можливість регулювання ширини нагрівання;
- 2 – відсутність оплавлення поверхневого шару;
- 3 – забезпечення рівномірної глибини структурних перетворень;
- 4 – досягнення необхідної мікроструктури зміцненого шару.

Плазмотрони для плазмового зміцнення повинні задовольняти як загальні вимоги, які властиві усім плазмотронам (висока потужність, стабільність параметрів плазмового потоку, значна енергетична ефективність, більша тривалість безперервної роботи, надійність конструкції, простота експлуатації), так і мати ряд специфічних властивостей: захищеність струмоведучих частин і здатність регулювання положення плазмотрона. Крім того, для забезпечення ефективного нагрівання матеріалів, з різними теплофізичними характеристиками в конструкції плазмотрона повинне передбачувати варіювання параметрів нагрівання в досить широких межах [79] .

При виборі генераторів плазми перевагу слід віддавати плазмотронам прямої дії (рис. 2.1). Це пов'язане з тим, що робота плазмотрона непрямої дії

супроводжується виділенням шуму з високим загальним рівнем, що вкрай різко погіршує санітарно-гігієнічні умови роботи терміста. Недоліком плазмотронів прямої дії є висока локальність нагрівання ними поверхні оброблюваної деталі [79].

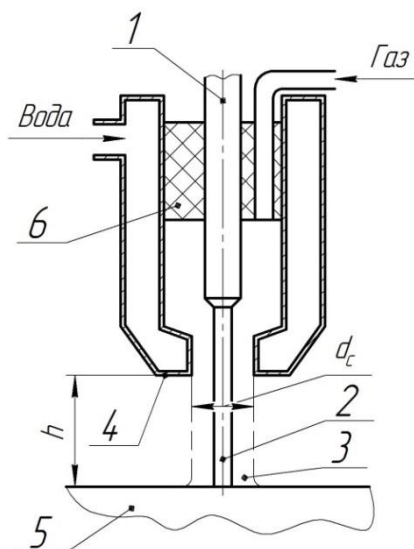


Рис. 2.1. Принципова схема плазмотрона прямої дії:

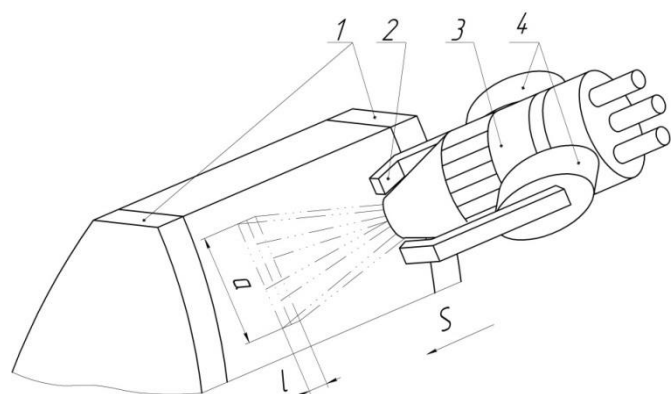
- 1 – електрод; 2 – електрична дуга; 3 – стовп нагрітого іонізованого газу;
4 – сопло; 5 – заготовка; 6 – ізолятор

З урахуванням викладених вимог був використаний однодуговий плазмотрон постійного струму ПВР-402М. Плазмоутворювальний газ – повітря.

Зниження локальності нагрівання здійснюється за рахунок накладення на потік генеруємої плазми зовнішнього змінного магнітного поля. Тому що потік плазми являє собою заряджені частки, які рухаються, тому це призводить до того, що заряджена частка плазми, що прямолінійно рухається, при влученні в зовнішнє магнітне поле відхиляється від первісного напрямку свого руху. Якщо первісний напрямок руху заряджених часток перпендикулярно силовим лініям магнітного поля, то в магнітному полі заряджені частки рухаються по дузі окружності. У результаті цього потік плазми виявляється як би зігнутим по дузі окружності. Розташування центру кривизни дуги окружності визначається напрямком силових ліній і магнітною індукцією зовнішнього магнітного потоку. Змінний характер зовнішнього магнітного поля приводить до коливань потоку плазми із частотою зміни магнітного поля, а при достатній частоті

магнітного поля інтегральна пляма нагрівання на поверхні заготовки витягається в лінію, наслідком чого є зниження локальності нагрівання.

Для створення зовнішнього магнітного поля плазмотрон прямої дії 3, що серійно випускається оснащують спеціальною магнітною системою (рис. 2.2 а).



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

а)



б)

Рис. 2.2. Схема пристрою (а) та експериментальна установка (б) для ППДЗ

Наконечники 2 мають водоохолоджуючі канали, тому що нагрівання металу наконечників вище температури, яка відповідає точці Кюрі, не допускається. Корпуса котушок 4 виконані з термостійкого ізолюючого матеріалу, наприклад фторопласт. Електромагнітні котушки підключають до джерела змінної напруги. Частота джерела може бути промисловою, тобто на рівні 50 Гц. Застосування розглянутого пристрою в комплекті із плазмотроном ППН-1М (діаметр сопла $d_c=6$ мм) дозволяє одержувати розмах коливань 0...60 мм, який регулюється шляхом зміни сили струму, що живить магнітну систему. Дослідження показали, що скануюча дуга забезпечує досить добру рівномірність теплового потоку, щільність якого може варіюватися як за рахунок зміни параметрів дуги, так і шляхом зміни амплітуди її коливань. Так само для запобігання оплавлення на краях деталі, до шестірни прикріплюються спеціальні накладки 1. Таким чином, комбінація плазмотрона прямої дії з описаною магнітною системою дозволяє мати потужне зосереджене теплове джерело для інтенсивного нагрівання поверхні оброблюваної деталі.

Переміщення такого джерела зі швидкістю, що перевищує швидкість поширення тепла в матеріалі оброблюваної деталі, приводить до інтенсивного відводу тепла від поверхневих шарів у тіло деталі. У результаті цього швидкість охолодження поверхневих шарів досягає декількох сотень градусів у секунду, що забезпечує структурні перетворення в металі поверхневих шарів деталі.

Ідея сканування плазмовою дугою поверхні виробу, використання якої на порядок знижує питому потужність нагрівання, збільшує глибину зміцнення, зменшує ймовірність оплавлення, і це все дає можливість направити високу електричну потужність дуги на підвищення продуктивності процесу зміцнення, була реалізована в технологічному комплексі обладнання для дослідження цього процесу (рис. 2.2 б).

Монтаж і експериментальні дослідження проводилися на токарно-карусельному верстаті мод. 1540, до якого підведена плазмова установка.

Установка містить у собі наступні елементи.

1. Токарно-карусельний верстат із плазмовою установкою АПР-402. На планшайбі встановлюється експериментальний зразок для зміцнення.
2. Плазмотроном ПВР-402М з укріпленням на ньому електромагнітним сканером.
3. Трансформатор змінного струму, що регулюється, для створення напруги в магнітній системі.

2.1.1. Обґрунтування конструктивних параметрів плазмотрона. Для регламентованого поверхневого нагрівання металів під термічну й хіміко-термічну обробку був використаний плазмотрон прямої дії, а в якості плазмоутворювального середовища – стиснене повітря. Застосування повітря економічно виправдане не тільки його низькою вартістю, але й високою тепломісткістю двохатомних газів [81] при порівняно низьких температурах дисоціації й іонізації. Одним з головних вимог до плазмотронів для ППДЗ є зменшення щільності енергії плазмової дуги на оброблюваній поверхні за умови збереження високої повної електричної потужності й продуктивності

процесу. Розв'язок цієї проблеми зведе до мінімуму оплавлення поверхні виробу й дасть можливість управляти процесом тепловкладення в необхідних межах. Найбільш раціональним прийомом розв'язання цього завдання, як відзначалося, є електромагнітне сканування дуги по оброблюваній поверхні [82]. У свою чергу, сканування дуги впливає на конструктивні й енергетичні параметри процесу плазмового нагрівання. Так, зазор між торцем сопла плазмотрона й поверхнею, що зміцнюється повинен бути по можливості максимальним, щоб забезпечити більшу ширину зони зміцнення за один прохід при мінімальній індукції в зазорі сканера, що також зменшить величину магнітного поля розсіювання сканера на феромагнітні ділянки сталевих деталей, що підвержені зміцненню. Крім того, подовження дуги підвищить спадання напруги на ній, а, отже, і її потужність.

Для рівномірного нагрівання поверхні, що зміцнюється, плазмотрон повинен генерувати потік з мінімально вираженим приосьовим катодним струменем, який, як відомо, до того ж знижує його середню температуру.

Формування низькотемпературної плазмової дуги дотепер не знайшло строгого математичного опису, і тому існуючі моделі поведінки дуги в турбулентному потоці газу [63, 64] не дозволяють аналітично оптимізувати конструктивні й енергетичні параметри дугової камери й сопла плазмотрона. Це тим більше відноситься до розглянутого випадку режиму роботи дугового плазмотрона зі скануванням. Тому було почато експериментальне визначення конструктивних параметрів плазмотрона для поверхневого зміцнення.

2.1.2 Матеріали та зразки для проведення досліджень. Експеримент проводили на зразках, виготовлених зі сталі промислових плавок. Для певної мети використовували зразки, вирізані з однієї заготовки, з попередньо визначеним хімічним складом для виключення впливу варіацій у межах марочного складу на результати дослідження. Для проведення експерименту були використані дві марки сталі: 40Х (сталь конструкційна легована, хромиста) і 45Г (сталь конструкційна легована, марганцева). Дані про хімічний склад матеріалів представлено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Хімічний склад експериментальних матеріалів

№	Матеріал (марка)	Хімічний склад, %										
		C	Si	Mn	Ni	Cr	W	Co	Mo	Ti	V	Інші
1	40X	0,41	0,32	0,55	0,1	1,0	–	–	–	–	–	–
2	45Г	0,48	0,2	0,9	<0,3	<0,3	–	–	–	–	–	–

Через високу продуктивність процесу плазмового поверхневого зміцнення й значних швидкостей щодо переміщення плазмотрона й виробу, що зміцнюється, зразки для дослідження структури і фазового складу сталі мали форму пластин (55x130). Така конструкція дозволяла виключити погрішності експерименту у зв'язку з нерівномірністю режимів обробки в період несталої швидкості переміщення при включенні й вимиканні установки. Мікроструктурним дослідженням піддавалися фрагменти цих зразків, вирізані із середньої частини.

2.2. Методика металографічних досліджень

З використанням металографічного методу [83-85] аналізувалась будова зміцнених плазменно-дуговим нагріванням поверхневих шарів сталей, а також проводився вимір мікротвердості структурних складових досліджуваних матеріалів.

Металографічні дослідження здійснювалися на поперечних шліфах. Шліфи для досліджень макро- і мікроструктури вирізали з масивних зразків (рис. 2.3) у перетині, перпендикулярному напрямку обробки. Препарування завершували на шліфувальному папері з остаточним поліруванням на фетровому диску з використанням пасту ГОИ. Ідентифікація окремих структурних складових сплавів при вивченні в оптичному мікроскопі здійснювалося після травлення в 4% - ом спиртовому розчині азотної кислоти.

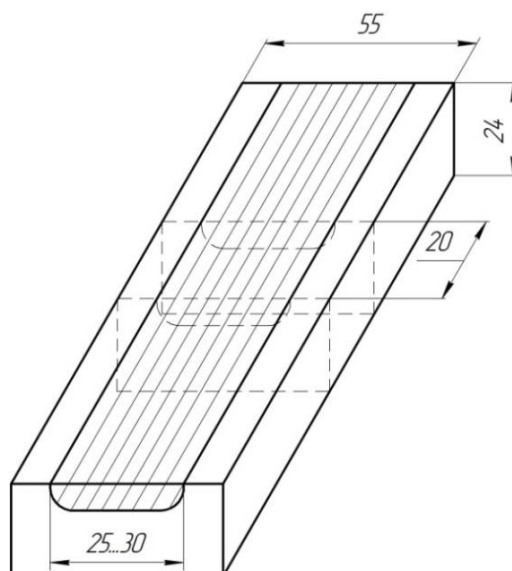


Рис. 2.3. Схема вирізки зразків для металографічних досліджень

Фотографічну зйомку макроструктури й металографічні дослідження мікроструктури виконано на оптичному мікроскопі МІМ-7 з використанням цифрової камери-окуляра Tucsен T500 (5 Мп) для металографічних мікроскопів (рис. 2.4). Для виводу знятої мікроструктури шліфа використовувався ПК.

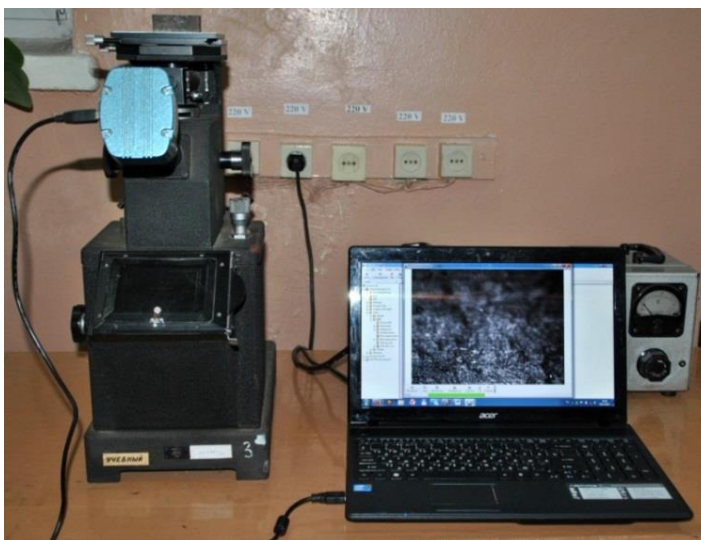


Рис. 2.4. Аналіз мікроструктури зразка на оптичному мікроскопі МІМ-7 з використанням цифрової камери-окуляра Tucsен T500Cx

Твердість на поверхні зразків визначали методом Роквелла на приладі ТКС-1М відповідно до вимог ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86).

2.3 Методика теплофізичних досліджень

Реєстрація кривих нагрівання й охолодження при швидкісних видах термічної обробки є обов'язковим етапом, оскільки швидкість і температура нагрівання визначають повноту аустенітизації. Таким чином, можливість прогнозувати результати плазменно-дугового зміцнення з'являється тільки у випадку наявності надійної інформації про температури й швидкості нагрівання й охолодження зміцнювальних шарів матеріалу.

Методика нагрівання містить у собі сканування плазмовою дугою по висоті зуба вала-шестірні поперек вектора поздовжньої подачі плазмотрона. Причому амплітуда сканування дугою пов'язана зі значенням висоти зуба шестірні. Для подальшого аналізу температурного поля, що виникає під дією такого джерела, необхідно знати його ККД, так як заздалегідь важко сказати, як вплине на його величину той факт, що при повторюваних циклах нагрівання протилежної сторони зуба могло проявлятися можливе теплонасичення матеріалу заготовки.

2.3.1. Методика дослідження тепловкладення при плазмовому нагріванні. З метою аналізу процесу нагрівання заготовки по описаному способу було проведено калориметрування при нагріванні зразка за схемою, представленою на рис. 2.5. Зразок зі сталі 40Х у вигляді кубика з розміром грані $4 \cdot 10^{-2}$ м нагрівався в муфельній печі до температури 300°C , яка контролювалася за допомогою контрольної термопари. При досягненні заданої температури зразок поміщувався в робочу рідину, у якості якої використовувався чистий гліцерин. Температура кипіння гліцерину досить висока (близько 300°C), що дозволяє скоротити втрати тепла на пароутворення в момент опускання нагрітого зразка в калориметрі. Зразок якийсь час витримувався в калориметрі, після чого фіксувалася різниця температур гліцерину, викликана передачею тепла від нагрітого металу.

Для дослідження динаміки, зміни температурного поля в матеріалі, заготовки при нагріванні скануючою плазмовою дугою були проведені

експерименти за допомогою штучних термопар, приварених конденсаторним зварюванням до дна отворів $\varnothing 1,6\text{мм}$, просвердлених із зворотної сторони заготовки (рис. 2.6).

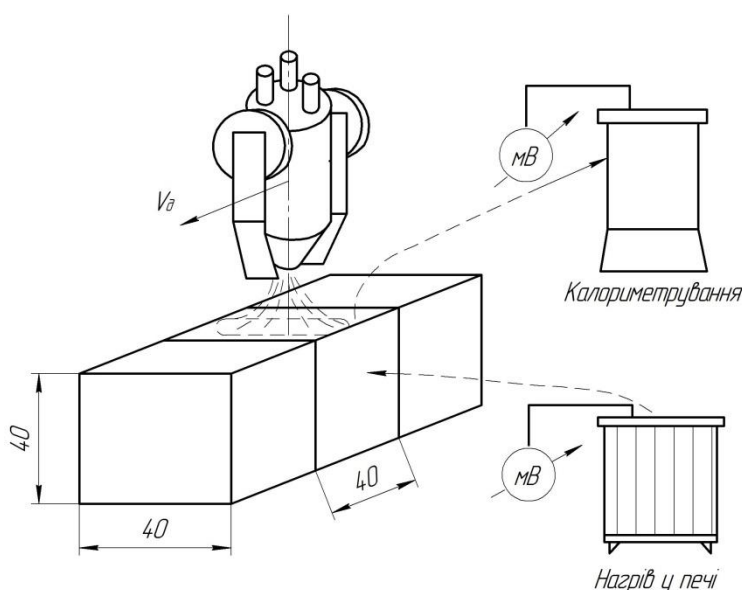


Рис. 2.5. Схема нагрівання зразка при визначенні ККД скануючою плазмовою дугою

Термопары 1 (хромель-алюмель, 0,15 мм) ізольовані від металу за допомогою скляних трубок 2 (0,7x0,3мм), фіксувалися від механічного зсуву компаундом 3, що складаються з маршаліту й рідкого скла. Такий склад після висихання має достатню міцність і витримує температуру нагрівання понад 1000°C , що вигідно відрізняє його від інших компаундів, наприклад, епоксидних.

Заготовка, що підготовлена для досліджень, представлена на рис. 2.7. На рисунку 2.8 представлений оригінальний пристрій для здійснення конденсаторного зварювання, який використовувався для приварювання термопар.

Тарування вимірювальних каналів світлопроменевого осцилографу Н-102 (рис. 2.9) здійснювалося за допомогою джерела постійної напруги КП-59 (клас 0.05), який дозволяє подавати сигнали на канал осцилографу в межах 0,01...100 мілівольт. Значення температури можна визначити, користуючись таблицею номінальних статичних характеристик алюмель-хромелевих термопар,

ГОСТ 3044-84, відповідно до яких по величині термоЕРС знаходиться значення температури робочого контакту в $^{\circ}\text{C}$. Описаний метод виміру температури більш точний, чим той, при якому тарування гальванометра осцилографа й термопар проводиться у ванні з розплавленим металом. Тарувальні графіки вимірювальних каналів дозволяють зробити висновок про прямопропорційну залежність відхилення променя осцилографа від температури. Чутливість вимірювальних каналів при цьому визначалася застосуванням гальванометром. Запис сигналу здійснювався на світлочутливий папір УФ-67-100, ТУ 6-17-633-79.

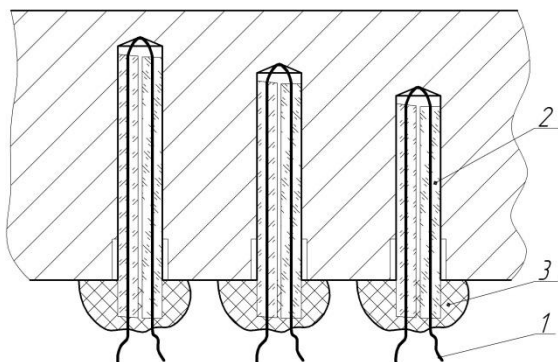


Рис. 2.6. Схема установки термопар: 1 – термопара, 2 – трубка, 3 – компаунд

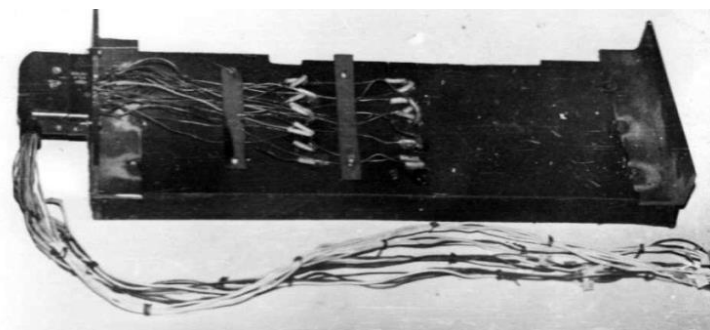


Рис. 2.7. Заготовка для дослідження температурного поля за допомогою термопар

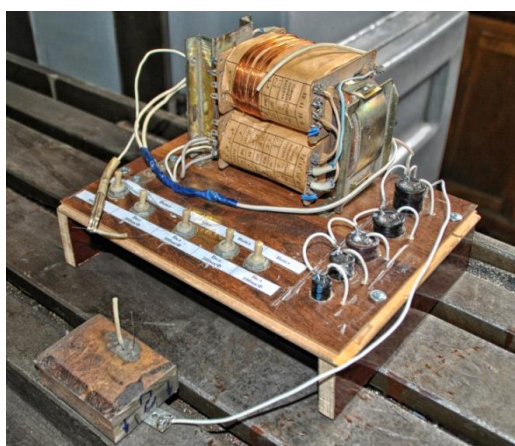


Рис. 2.8. Пристрій конденсаторного зварювання для монтажу термопар



Рис. 2.9. Загальний вид осцилографа Н-102

Аналіз літературних джерел і варіантів промислової реалізації привів до створення пірометра. Його загальний вид і пристрій, якого представлено на рис. 2.10, чутливим елементом даного пірометра є пластинка германія, що входить до складу транзистора МП41А.

Пірометр складається з корпусу 1 з підсилювачем, оправки 2, на якій установлений датчик 3, екран 4, світловод 5. Світловод, що відіграє роль діафрагми, електрично ізольований від оправки фотодатчика втулкою 6. Екран 4 являє собою пластинку із чистого кремнію, він служить як фільтр від променів світлової й ближньої інфрачервоної області спектра.

Схема виміру показана на рис. 2.11. Пірометр закріплювався за плазмотроном на відстані $Z = 100\text{мм}$. Світловод 5 має відстань від свого нижнього зрізу до поверхні заготовки 10 мм. При нагріванні поверхні плазмовою дугою пірометр робив такі ж рухи, що й плазмотрон, і фіксував зміну температури поверхні в процесі остигання по всій ширині нагрівання. Запис сигналу здійснювався на світлопроменевий осцилограф Н-117, набір апаратури для тарування каналів якого представлений на рис. 2.12.

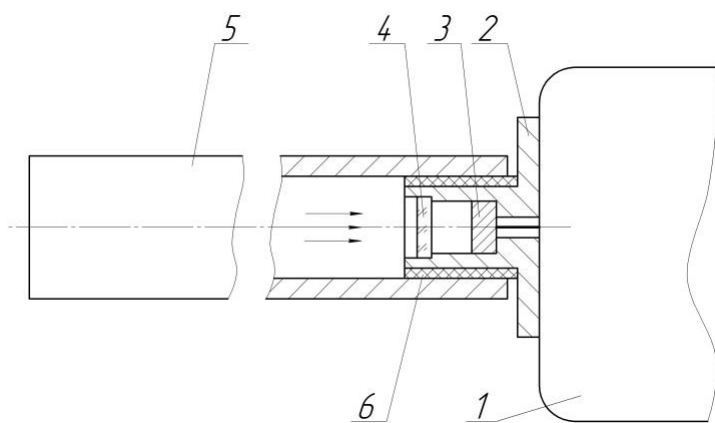


Рис. 2.10. Загальний вид оптичного пірометра

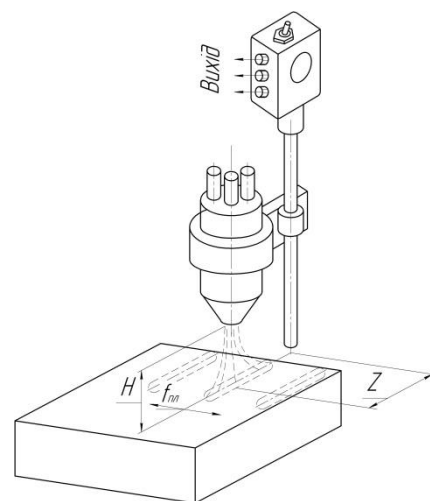


Рис. 2.11. Схема виміру температури поверхні заготовки

Тарувальний пристрій складається із трансформатора 1, панелі 2 із пластиною, що нагрівається, 3, осцилографа 4. До пластины 3 приєднана контрольна термопара 5, показання якої реєструються приладом 6. Тарувальний графік пірометра наведений на рис. 2.13.



Рис. 2.12. Загальний вид тарувального пристрою

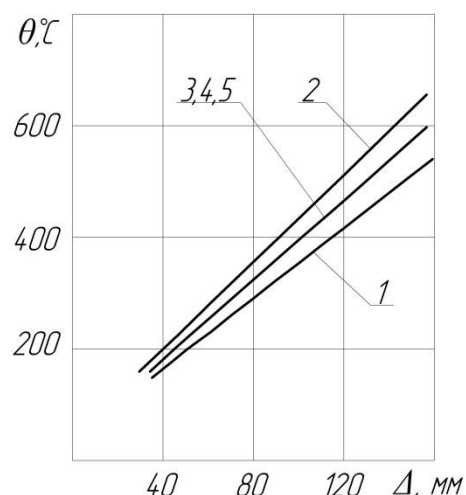


Рис. 2.13. Тарувальні графіки вимірювальних каналів осцилографа

2.3.2. Оцінка динамічної твердості поверхні після плазмового нагрівання. З різних способів виміру динамічної твердості був обраний, як найбільш доступний, спосіб Мартеля [86], який установлює залежність між роботою деформації й діаметром відбитка. За динамічну твердість приймається відношення кінетичної енергії індентору до обсягу відбитка. Його переваги в порівнянні, з аналогами, наступні: оперативність досліджень; простота реалізації; відносно низькі витрати.

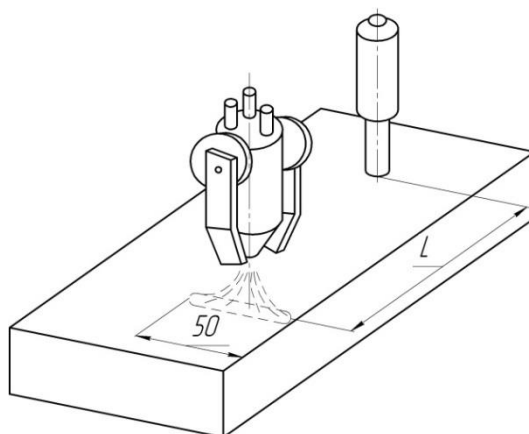


Рис. 2.14. Схема виміру динамічної твердості заготовки після плазмового нагрівання

Випробування проводилися за допомогою спеціального пристрою за методикою, описаною в роботах [87]. Схема виміру представлена на рис. 2.14.

Діаметр відбитка фіксувався лупою Бринеля, після чого проводилася обробка даних у вигляді побудови графіків і таблиць

2.4. Методика розрахунків і випробувань відкритих зубчастих передач на довговічність за умови зношування зубів

2.4.1 Методика виміру зношування зубів. Для виміру величини зношування був обраний метод порівняння профілю й товщини зуба до й після зношування [88]. Застосування цього методу обґрунтоване тим, що величина зношування зубів відкритих пар млинів досягає значної величини при відносно невеликому часі роботи зубчастої передачі. Для вимірів використовувався штангензубомір, що забезпечує точність вимірів 0,02 мм. Відкриті зубчасті пари досліджуваних млинів – нереверсивні. Це дозволило неробочу поверхню зуба використовувати як базову й поряд з вимірами величини зношування визначати профіль зношеного зуба. Величина зношування по товщині зуба вимірялася через кожні 5 мм по висоті, а також у три й більш крапках по ширині зуба. Отримані результати вимірів потім усереднювались. Величина зношування визначалася порівнянням товщини зуба до й після випробувань на тій самій відстані від вершини. Для порівняння швидкості зношування зубчастих передач із різними параметрами зручно представляти величину зношування ΔS в залежності від числа циклів зачеплень [88]:

$$N = cnt, \quad (2.1)$$

де c – число зачеплень за один оберт;

n – частота обертання, об/хв;

t – час, год.

2.4.2. Оцінка ресурсу зубчастих коліс зі зміцненими зубами. Загальні закономірності абразивного зношування евольвентних зубчастих передач наведені в роботах [89, 90]. Ці закономірності враховують вплив наведеного радіуса кривизни, тиску, питомого ковзання й схеми влучення абразивних часток у зону торкання. Зміна цих факторів визначає розподіл зношування по

профілю зуба, У роботі [89] теоретично показана й експериментально підтверджена слабка залежність абразивного зношування від навантаження при більших тисках у контакті.

Зношування оцінювалося за зміною товщин зуба, обмірюваних в 10 крапках профілю від ніжки до головки зуба. Мале зношування в ніжки зуба пояснюється утрудненістю доступу абразивних часток у цій зоні. Підвищене зношування спостерігалось на головці зуба.

По ступеню зношування або пошкодження робочої поверхні зуба звичайно оцінюють ресурс передачі.

Для відкритих передач граничним зношуванням при оцінці ресурсу з погляду вигинної міцності є зношування, що дорівнює $0,3$ модуля ($0,3m$). Порушення кінематичної точності спостерігається при зношуванні, що перевищує $0,025 m$ [91]. Зношування провокує зародження й розвиток тріщин під дією напруг розтягання.

Розглянемо підхід до оцінки ресурсу роботи відкритих зубчастих передач, заснований на даних експлуатації й враховуючий опір зношуванню конкретного матеріалу коліс (сталь 40X).

Запишемо граничне зношування зуба по товщині у вигляді [92]

$$[\Delta S] = 0,3m, \quad (2.2)$$

де m – модуль зубчастого колеса.

У відсотковому відношенні поточне значення зношування зубів визначається вираженням [92]:

$$\Delta S = \left(1 - \frac{S_n}{S_0}\right) \cdot 100, \%$$

Тут S_0 – товщина зуба до експлуатації, мм; S_n – товщина зуба після зношування за час T , мм.

Порівняємо процеси зношування зубів без зміцнення поверхневого шару й зі зміцненням на глибину a . Нехай інтенсивність зношування матеріалу й зміцненого шару буде відповідно рівна I_{hm} і I_{hf} , де лінійна інтенсивність зношування являє собою відношення $I_h = d\Delta S / dL$. На рис. 2.15 представлені

залежності зношування ΔS від шляху тертя L для матеріалів зі зміцненим шаром і без нього.

Якщо через відношення $I_{hm}/I_{hf} = \beta$ то пряма 1 (рис. 2.17) характеризується величиною $\beta = 1$, а для ламаної прямої 2 – $\beta > 1$ на ділянці $[0, L_1]$. Очевидно, застосування зносостійкого покриття приводить до збільшення шляху тертя (ресурсу) при фіксованому значенні граничного зношування $[\Delta S]$. Залежності представлені на рис. 2.15, носять лінійний або кусочно-лінійний характер, тобто інтенсивність зношування вважається постійної, що виправдане для процесу абразивного зношування [93, 94].

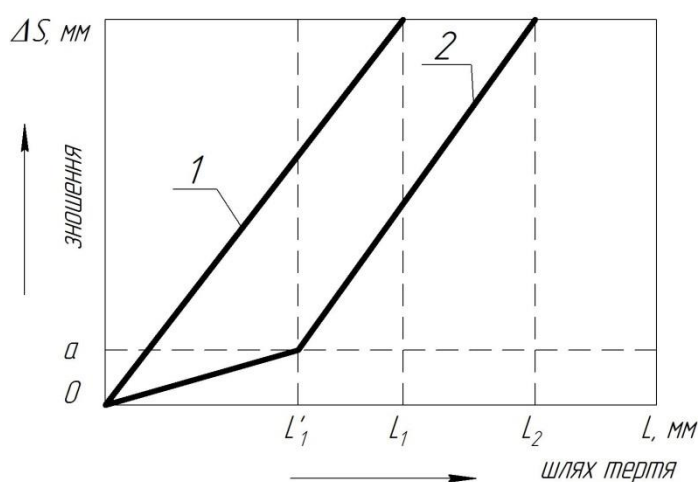


Рис. 2.15. Якісна залежність зношування ΔS від шляху тертя L :

1 – для зубчастих коліс без зміцненого поверхневого шару зубів;

2 – зі зміцненим шаром товщиною a

Визначення необхідної товщини зміцненого шару не становить труднощів, якщо відомий ресурс у годинах $[T]$ або шлях тертя $[L]$ зубчастого колеса, відповідає заданому ресурсу. Ресурс, у свою чергу, зіставляється з ресурсом «слабкої ланки» приводу рудорозмельного млина або є величиною, кратною терміну служби всього рудорозмельного млина й пов'язаною з профілактичними й ремонтними операціями.

Якщо зносостійкість матеріалу зубчастого колеса не забезпечує заданого ресурсу, вираженого в одиницях шляху тертя $[L] = L_2$, то необхідна товщина зносостійкого покриття або зміцненого шару визначається виразом [92]:

$$I_{hf} \cdot L'_1 + I_{hm}([L] - L_1) = [\Delta S]. \quad (2.3)$$

Підставивши $I_{hf} \cdot L' = a$ і $\beta = I_{hf} / I_{hm}$ у рівняння (2.3), після нескладних перетворень отримаємо [92]:

$$a = \frac{\beta \cdot I_{hf}[L] - [\Delta S]}{\beta - 1}. \quad (2.4)$$

Таким чином, знаючи інтенсивність зношування матеріалу й покриття (зміцненого шару), граничне зношування $[\Delta S]$ і термін служби $[L]$, можна знайти товщину покриття або зміцненого шару.

Слід зазначити, що фактори, які визначають товщину зміцненого шару, є випадковими величинами й мають розкид значень. Зокрема, прийнятним розподілом для такої величини, як інтенсивність зношування, є нормальний розподіл, тому що ця величина залежить від великого числа випадкових по природі факторів. До них відносяться неоднорідність структури й твердості матеріалу, фракційний склад абразивних часток, інтенсивність влучення часток у зону тертя й інше.

2.4.3. Обґрунтування методики випробувань на зносостійкість.

Зносостійкість деталей визначається сукупністю внутрішніх і зовнішніх факторів, до яких відносять: фізичні, хімічні й механічні властивості тертьових поверхонь, рід і характер тертя; величину питомого навантаження, що діє між тертьовими поверхнями; температурні умови; корозійний вплив зовнішнього середовища; ступінь і спосіб видалення продуктів зношування і т.д. Із усіх перерахованих факторів основний вплив на зносостійкість металів має їх структура, що визначає опір просуванню дислокацій під дією зовнішніх сил. Інші фактори або сприяють утворенню певної структури (хімічний склад, термічна обробка), або самі залежать від неї (механічні властивості). Плазмова поверхнева обробка сприяє утворенню поверхневого шару зі структурою загартування. Твердість цього шару підвищується в порівнянні з вихідним станом в 2...3 і більш раз. Тому слід очікувати значного підвищення зносостійкості.

При виборі методу випробувань деталей після плазмового зміцнення на зносостійкість виходили з того, що найпоширенішим є абразивне зношування, під яким звичайно розуміють руйнування поверхневого шару деталей при терті ковзанні, обумовлене наявністю в зоні тертя абразивного середовища.

У ряді робіт, присвячених проблемам зношування зубчастих передач [89, 95, 96], зазначено, що форма зношеного зуба може бути різною залежно від умов навантаження й роботи зубчастої передачі. На прикладі відкритих передач показано існування чітко виражених ділянок з різними видами вторинних структур і руйнування (середня ділянка – механохімічне зношування, вхідна і вихідна ділянки – контактна втома). Розподіл цих площ узгоджується з рівнем навантаження, реологічними й фізико-хімічними властивостями середовища.

Границі між зонами являють собою області з нестійкою структурою, що обумовлено зміною виду тертя й мастильної дії. Таким чином, при оцінці форми зношеної поверхні слід урахувувати твердість зубів, а також твердість системи зубчасті колеса – вали.

Існуюча методика розрахунків на зношування зубів, при наявності абразивних часток, передбачає й наявність у розрахункових залежностях параметра у вигляді безрозмірної інтенсивності зношування. Значення цих параметрів можуть бути визначені тільки експериментально при модельних і стендових випробуваннях стосовно до розглянутих матеріалів і умовам роботи зубчастих коліс.

Є два основні методи розрахунків деталей, що зношуються, на довговічність: статистичний – визначення ресурсу деталей за результатами статистичної обробки даних про зношення реальних деталей в умовах експлуатації й динамічний – визначення швидкостей або інтенсивності зношування при відомій навантаженості, швидкості ковзання, стану поверхні й наявності абразивних часток у зоні тертя [97].

Статистичний метод знаходить застосування в практиці служб експлуатації й ремонту. Його застосування дозволяє планувати витрати запасних частин, установлювати періодичність ремонтних робіт і визначати

припустимі значення зношення. До недоліків розрахунків, заснованих на статистичному методі, віднесемо необхідність мати великий обсяг даних, який можна одержати лише після тривалої експлуатації значного парку однотипних машин. Динамічні розрахунки базуються на аналізі механізму процесів тертя й зношування й дозволяє розрахувати з тієї або іншим ступенем наближення інтенсивність зношування різних матеріалів і їх комбінацій.

Таким чином, розвиток динамічного методу спрямовано на підвищення точності розрахунків. На жаль, усі особливості абразивного зношування зубів сховані в інтегральному коефіцієнті зношування, яке є визначальним при оцінці зношування зубів.

Абразивні частки мають різні розміри, форму й твердість. Це означає, що закріплення частки в одній з довільних точок поверхні контакту має імовірнісний характер.

Експериментальні дослідження зношування зубів при наявності абразивних часток, що подаються в зону зачеплення проводилося за допомогою стенда на базі токарного верстата 1A625 (рис. 2.16).



Рис. 2.16. Загальний вид стенда для дослідження зношування зубчастих коліс

Електродвигун верстата через коробку швидкостей і патрон повідомляє кутову швидкість, добуток цієї кутової швидкості на крутний момент шпинделя є потужність, що навантажує зубчасті колеса. Передатне відношення зубчастих пар у всіх дослідках прийняте однаковим.

Частоту обертання й загальне пройдене число циклів навантаження вимірюють лічильником n . Навантажувальний крутний момент під час роботи стенда не змінювався. Зношування зубчастих коліс оцінювалося методом мікрометрування (рис 2.17) на мікроскопі БМИ. При цьому в зону зачеплення під час проведення експерименту, з метою імітації реальних умов роботи, подавався порошок неагломерованого залізорудного концентрату (табл. 2.2). Установка для оптичного контролю зношування наведена на рис. 2.17.



Рис. 2.17. Установка для оптичного контролю величини зношування

Таблиця 2.2

Хімічний склад залізорудного концентрату

Хімічний склад, %											
Fe	Feo	Fe ₂ O ₃	Mno	CaO	Mgo	Al ₂ O ₃	S	P ₂ O ₅	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
65,6	25,33	6,34	0,11	0,58	0,8	0,40	0,15	0,025	0,54	0,062	0,063

На даному етапі досліджень необхідно одержати підтвердження, чи можуть подальші розрахунки базуватися на аналітичній узагальненій моделі, сформованій на положеннях теорії втомного зношування й тріщиностійкості навантаженої пари зубчастих коліс.

Висновки до розділу 2

1. Розглянуто особливості технології плазмового зміцнення поверхонь зубів великомодульних коліс. Сформульовані вимоги, яким повинно задовольняти джерело нагрівання в умовах даного способу обробки, а саме – зміцнення великомодульних зубчастих передач.

2. Розроблена методика розрахунків оптимальних режимів плазмової обробки зразків з конструкційних легованих сталей, що заснована на обліку теплофізичних параметрів плазмового струменя.

3. Розроблений спосіб термічної обробки великомодульних зубчастих коліс, який включає нагрівання без оплавлення плазмовою дугою з магнітно-відхиляючою системою робочих поверхонь зуба з амплітудою, яка рівняється висоті зуба. Даний спосіб захищений патентом № 103171 від 20.12.2015 і підтверджений експертизою патентоспроможності.

4. Розроблена методика підготовки зразків і досліджень фазового складу й структури зміцненого шару з використанням металографічних досліджень, що дозволяє досить точно й коректно проектувати зміцнені шари із заданими властивостями.

5. Розроблена методика досліджень тепловкладення при зміцненні плазмовою дугою, яка сканує в змінному магнітному полі, що дозволяє здійснювати ефективне нагрівання та структурні перетворення в поверхневих шарах деталей.

6. Для оцінки й прогнозування працездатності великомодульних зубчастих передач із зміцненим поверхневим шаром, що експлуатуються в умовах ударно-абразивного зношування, необхідні комплексні дослідження й випробування абразивної зносостійкості. Обрані й обґрунтовані методики випробувань із урахуванням умов роботи деталей з конструкційних легованих сталей, що зазнають ППДЗ.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОЇ ОБРОБКИ ВЕЛИКО-MОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

3.1. Теоретичне обґрунтування можливості збільшення залишкового ресурсу зубчастих коліс шляхом впливу на поверхневу твердість концентрованими джерелами енергії

Спочатку обґрунтуємо можливості застосування плазмової скануючої дуги, як ефективного джерела нагрівання для поверхневого зміцнення.

При обробці матеріалів під КДЕ (енергетичними пучками) розуміють різні електрофізичні методи й поля, що створюють на оброблюваній поверхні щільність енергетичного потоку (питому потужність) у технологічному діапазоні $10^8 - 10^{13}$ Вт/м² [98]. При цьому енергія не поділяється на види технологічного впливу, будь то енергія потоку фотонів, заряджених часток, теплової дії електричного струму або електромагнітного поля. Усі види обробки КДЕ поєднує загальний принцип роботи технологічного обладнання - пряме перетворення електричної енергії в енергію впливу на структурно-фазові або атомно-молекулярні перетворення в оброблюваному металі. Враховуючи ці обставини, є очевидною важливість узагальненого підходу з єдиних позицій до всього спектра процесів, що протікають при обробці КДЕ.

Основною метою технології з використанням КДЕ є можливість цілеспрямованої зміни властивостей поверхневих шарів виробів для забезпечення оптимального співвідношення властивостей поверхні й обсягу матеріалу, з яких вони виготовлені.

Модифікація властивостей поверхневого шару за допомогою КДЕ включає широку гаму технологічних прийомів: оплавлення поверхні й зміна її мікрорельєфу; загартування у твердій фазі й з рідкого стану; аморфізацію й

хіміко-термічну обробку; ударне зміцнення за рахунок силового впливу енергетичного пучка; іонну імплантацію й ін.

У результаті впливу КДЕ поверхневі шари виробів піддаються швидкісному нагріванню до високих температур, охолоджуються й у них реалізуються фазові, структурні та субструктурні перетворення в настільки нерівноважних умовах, що ці шари отримують унікальні властивості, які неможливо реалізовувати традиційними методами зміцнення.

У переважній більшості випадків із цією метою використовується загальний для всіх джерел КДЕ тепловий або термічний вплив на поверхневі шари матеріалу.

Аналіз теплового впливу енергетичного пучка, незалежно від його природи, доцільно розділити на дві частини, що стосуються як самого джерела теплоти, так і об'єкта, що нагрівається.

Для кількісної оцінки параметрів КДЕ як теплового джерела немає необхідності проводити аналіз елементарних актів взаємодії окремих часток, фотонів або електромагнітних полів з речовиною оброблюваного матеріалу. Для цього досить знати інтегральний ефект такої взаємодії – виникнення на ділянці поверхні джерела тепла, яке характеризується повною потужністю, питомою ефективною потужністю q (враховуючої відсоток усієї потужності пучка, який переходить у тепло віднесений до одиниці площі плями нагрівання) і часом τ її дії. Під останнім розуміють для імпульсного джерела тривалість імпульсу, а для того, що рухається – час проходження власної плями нагрівання в напрямку руху. Крім того, необхідно знати закон розподілу щільності теплового потоку джерела на плямі нагрівання (не розглядаються тривимірні - об'ємні джерела). Більшість енергетичних пучків характеризується законом нормального розподілу потоку, однак, в інженерній теплофізиці звичайно користуються усередненою величиною питомої потужності, що розраховується з умови рівномірного розподілу теплового потоку на плямі нагрівання меншого ефективного діаметра [99]. Такий підхід не тільки спрощує теплофізичні розрахунки, але й полегшує порівняння різних КДЕ по параметру питомої

потужності. Спроби деяких авторів описати теплове джерело тільки питомою потужністю [100] або питомою енергією [101] слід визнати некоректними.

Тіло, що нагрівається, як приймач тепла джерела, має певний коефіцієнт поглинання енергії даної фізичної природи й здатність до теплоперенесення від поверхні нагрівання, пов'язану з теплофізичними константами матеріалу.

Втрати енергії при транспортуванні на шляху від джерела, викликані розсіюванням на поверхні тіла, можуть бути враховані ефективним ККД нагрівання, яке визначається експериментально по відомим методикам, наприклад, калориметруванням. Таким чином, ефективна питома потужність q_2 конкретного джерела й час його впливу при заданих енергетичних і геометричних параметрах процесу нагрівання є відомими величинами. Можливість матеріалу до переносу теплової енергії також може бути розрахована по його теплофізичних константах і відомим розв'язкам завдань теплопровідності в суцільних середовищах, більшість яких у цей час опубліковано [99, 102, 103].

На базі одного з таких розв'язків [104], виконаного для випадку нагрівання напівнескінченного тіла швидкорухомим смуговим тепловим джерелом з нульовими початковими й граничними умовами 2-го роду (ГУ2), простежимо за умовами теплового балансу на поверхні тіла, що нагрівається.

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 співвідношенням [118]:

$$T = \frac{q_2 \cdot \sqrt{\omega \cdot l}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi \cdot V}} \quad (3.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

ω – коефіцієнт температуропровідності матеріалу.

Оскільки l/V – час дії теплового джерела τ на плямі нагрівання, то вираження (3.1) можна записати у вигляді [118]:

$$T = \frac{q_2 \cdot \sqrt{\omega}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\tau} \quad (3.2)$$

Ввівши обмеження $T \leq T_{\text{п}}$, яке впливає за умови нагрівання поверхневого шару матеріалу без оплавлення, виразивши питому потужність q_2 через інші параметри, одержимо:

$$q_2 = \frac{T_{\text{п}} \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{\omega \cdot \tau}} \quad (3.3)$$

Права частина формули (3.3) за винятком часу τ являє собою константу, що залежить тільки від теплофізичних характеристик матеріалу. Розрахуємо величину q_2 для сталі 40Х, прийнявши $T_{\text{п}} = 1500^\circ\text{C}$; $\omega = 0,08 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda = 40 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ і, вибравши час $\tau = 1 \text{ с}$, виходячи з того, що фізична суть поняття питомої потужності це енергія, що підводиться до одиниці площі в одиницю часу. Тоді q_2 складе $3,8 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$, що являє собою граничне значення ефективної питомої потужності джерела, яку здатне поглинути сталеве тіло за рахунок теплопровідності без оплавлення поверхні. Аналогічно можна розрахувати граничне значення питомої потужності джерела для досягнення пароутворення на поверхні тієї ж марки сталі, прийнявши температуру кипіння $T_{\text{кип}} = 3100^\circ\text{C}$. Розрахунки для цього випадку дає значення $q_2 = 7,8 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$.

Таким чином, при обробці КДЕ фактором, що лімітує, є можливість матеріалу поглинати енергію й транспортувати її за рахунок теплопровідності від плями нагрівання. Якщо темп підведення енергії перевищує в цьому сенсі можливості матеріалу, то виникає теплове перенасичення його поверхневих шарів з наступною поетапною зміною агрегатного стану.

Проаналізуємо спочатку вираження (3.2) для випадку, коли температура на поверхні сталевого виробу $T \leq T_{\text{п}}$, який реалізується у варіанті, що найбільше часто зустрічається, поверхневого зміцнення із твердого стану. Видно, що для досягнення умови $T \leq T_{\text{п}}$, необхідно виконати іншу умову - сталість добутку $q_2 \sqrt{\tau}$, величина якого визначається винятково теплофізичними властивостями даного класу матеріалів. Розрахуємо для середньовуглецевої сталі час нагрівання до досягнення температури плавлення на поверхні тепловим джерелом в інтервалі q_2 від 10^6 до 10^9 Вт/м^2 , який охоплює можливості більшості використовуваних промислових джерел КДЕ. Результати

розрахунків показують, що на пряму залежності питомої потужності джерела від часу його впливу лягають всі в цей час відомі КДЕ, від СВЧ до лазерного й електроннопроменевого, оптимальні енергетичні інтервали застосування яких відомі [105].

Незалежно від виду джерел кожному значенню питомої потужності відповідає певний час його дії для досягнення на поверхні сталі температури плавлення, а, отже, кожна комбінація цих параметрів визначить і свою глибину поверхневого шару сталі з трансформованою у результаті теплового впливу структурою й властивостями. Скористаємося тепер виразом, що описують розподіл температури за глибиною нагрітого шару [104] і розрахуємо температурні поля в сталі для декількох значень питомої потужності ($q_2 = 10^7 \div 10^9$ Вт/м²) при колишній умові $T \leq T_{II}$. Результат розрахунків, наведений на рис. 3.1 показує, що картина температурного поля суттєво залежить від величини питомої потужності нагрівання. Якщо з урахуванням швидкості нагрівання прийняти, що передзагартований стан у сталі може бути забезпечено на глибині з ізотермою 1000°C, то як видно з рис. 3.1 глибина загартованого шару δ для $q_2 = 10^7, 10^8, 10^9$ Вт/м² буде 10; 1 і 0,1 мм відповідно.

Продиференціювавши вираз (3.1) за часом одержимо вираз, за допомогою якого можна оцінити порядок величини швидкостей нагрівання V_H на поверхні сталевих виробів, відповідних до зазначеного інтервалу питомих потужностей [119]:

$$V_H = \frac{dT}{d\tau} = \frac{q_2 \cdot \sqrt{\omega}}{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi \cdot \tau}} \quad (3.4)$$

Розрахунки за формулою (3.4) показує, 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 [104, 105] про оптимальні швидкості нагрівання джерелами КДЕ, із зазначеними рівнями питомої потужності.

Збіг за результатами, отриманими іншими авторами, і порівняння із власними експериментальними даними підтверджують, що основними параметрами обробки КДЕ є винятково ефективна питома потужність джерела

й час його впливу на ділянку поверхні нагрівання (для джерела, що рухається, відношення його довжини в напрямку руху до швидкості). Підміну цих параметрів іншими, наприклад, уведенням у формулу для розрахунків питомої потужності джерела швидкості його переміщення [106], або використання критичних комбінацій параметрів обробки у вигляді розмірних комплексів [54, 107] навряд чи можна вважати виправданими. Останні не несуть чіткого фізичного змісту і є по суті добуванням окремих параметрів з вираження (3.1) або подібних формул для точкових, лінійних або нормально-кругових джерел.

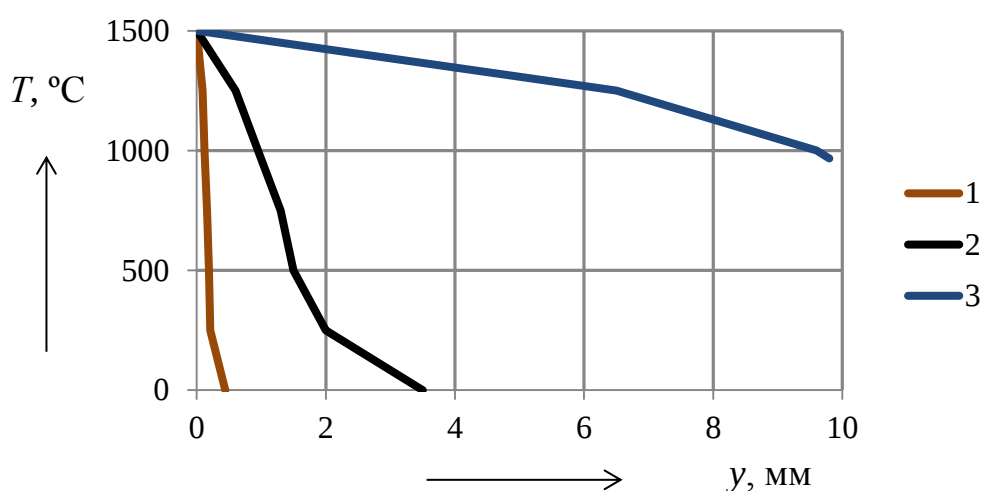


Рис. 3.1. Температурні поля по перетину шару, що нагрівається, сталі джерелами різної інтенсивності, при досягненні на поверхні температури плавлення: 1 – $q = 10^9$ Вт/м²; 2 – $q = 10^8$ Вт/м²; 3 – $q = 10^7$ Вт/м²

Необхідно особливо підкреслити, що при визначенні питомої потужності джерела для теплофізичних розрахунків слід урахувувати ефективний ККД нагрівання, зневага яким може привести до істотних помилок. Очевидно, розрахунки питомої потужності по енергії й тривалості імпульсу без ККД при лазерному нагріванні, ефективний ККД якого порядку 5% [73], дасть погрішність на порядок вище.

Для іншого різновиду поверхневого зміцнення – хіміко- термічної обробки з використанням джерел КДЕ – принцип розв'язку теплового завдання зберігається, але трохи міняються її умови. Режими регламентованого

проплавлення можуть бути розраховані аналогічно глибині загартування, при умові глибини залягання ізотерми рівній температурі плавлення.

Іншим важливим фактором, що визначають результати зміцнення сталі, є швидкість охолодження нагрітого шару після припинення дії джерела КДЕ. Часто доводиться зустрічатися з думкою, що швидкість охолодження за рахунок теплопровідності в холодний об'єм при обробці КДЕ по порядку величини, збігається зі швидкістю нагрівання [73]. Однак, це твердження не універсальне й виконується для сталі, імовірно, від величини питомої потужності нагрівання 10^9 Вт/м², яка, як було показано вище, забезпечує глибину зміцнення без оплавлення поверхні в межах 0,1-0,15 мм. При зменшенні питомої потужності й відповідному росту глибини шарів, що прогриваються, ця умова не виконується й швидкість охолодження знижується настільки, що може виявитися менше критичної швидкості загартування сталі. Для з'ясування причин цієї обставини були виконані розрахунки температурних полів по перетину нагрітого шару сталі двома джерелами КДЕ з питомими потужностями $0,81 \cdot 10^8$ і $4,86 \cdot 10^8$ Вт/м², при швидкостях переміщення 30 мм/с і 200 мм/с відповідно, які були обрані з умови рівності глибини залягання ізотерми 1000°C ($y=0,55$ мм).

З рис. 3.2 очевидна причина значного зниження швидкості охолодження при зменшенні питомої потужності нагрівання, яка полягає в тому, що для кривої 1 внаслідок малого градієнта температур по глибині під шаром, нагрітим до передзагартованого стану (1000°C), присутня протяжна зона з підвищеною температурою, яка знижує тепловідвід у глибинні холодні шари. Такий розподіл температур повинен мати два важливі наслідки з погляду формування структури загартованих шарів сталі. Для режиму з розподілом температур по кривій 1 очевидно повинна з'явитися перехідна зона від загартованого шару сталі до вихідної структури, а для кривої 2 - такої зони не буде, але з'являться прошарки оплавлення й грубозернистої структури внаслідок значного перегріву поверхневих шарів, що може також супроводжуватися частковим викидом металу із зони оплавлення.

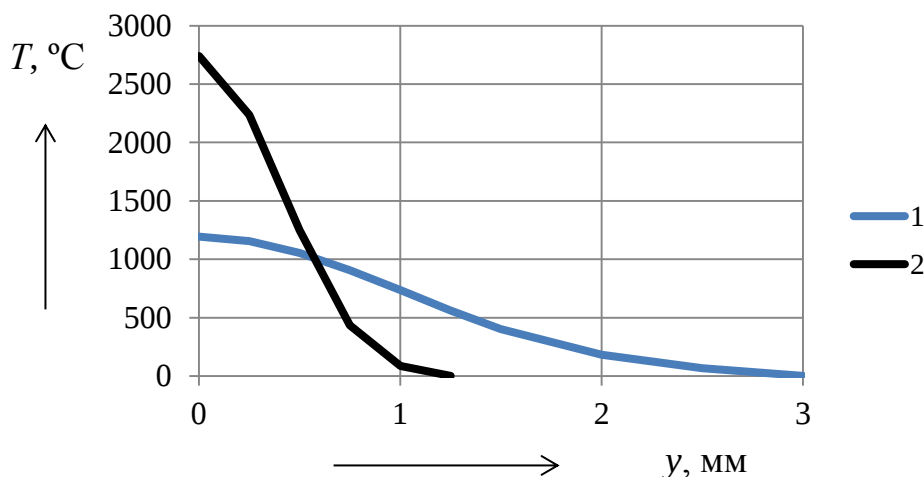


Рис. 3.2. Результати розрахунків температурного поля по перетину нагрітого шару джерелами:

$$1 - q = 0,81 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2; V=30 \text{ мм/с}; 2 - q = 4,86 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2; V=200 \text{ мм/с}$$

Таким чином, при нагріванні сталі КДЕ з ефективною питомою потужністю менш 10^8 Вт/м^2 цілком імовірна ситуація, при якій виникає необхідність додаткового гартівного охолодження, особливо для випадку, коли перетин холодної серцевини виробу десятикратно не перевищує глибину нагрітого шару. Така емпірична залежність була отримана раніше [108] для середньовуглецевих сталей. При невиконанні цієї умови й необхідності загартування нагрітих шарів великої теплоємності, потреба в додатковому охолодженні очевидно повинна виникати, як це завжди має місце для нагрівання СВЧ із концентрацією магнітного поля, робоча область параметрів якої безпосередньо граничить із розглянутої (10^8 Вт/м^2).

Вищесказане дає можливість констатувати, що інтерес до обробки матеріалів КДЕ питомою потужністю понад 10^8 Вт/м^2 обмежується такими напрямками, як: радіоелектроніка, розмірна обробка, зварювання, термозміцнення інструмента, плазмохімія й ін., які мають справу з шарами, що нагріваються, глибиною менш 0,1 мм.

Вивчення зміни структури й властивостей у шарах такої глибини металевих матеріалів під впливом зазначеного рівня енергії розкриває фундаментальні проблеми протікання нагрівання, плавлення, кристалізації,

охолодження та структурно-фазових перетворень в умовах гіперневрівноваженості.

Однак, область інтересів практичного матеріалознавства й техніки переважної більшості виробів машинобудування й інших областей промисловості перебуває в інтервалі глибин зміцнення від 0,3 до 3,0 мм. Як було показано вище, цьому інтервалу відповідає нагрівання джерелами КДЕ ефективною питомою потужністю порядку 10^8 Вт/м², яке забезпечується скануючою плазмовою дугою.

Крім того, на базі аналізу опублікованих робіт, можна зробити обґрунтований висновок про доцільність подальших досліджень впливу параметрів КДЕ на фізико-механічні характеристики оброблюваних матеріалів, з метою підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих передач.

На наступному етапі необхідно обґрунтувати можливості цілеспрямованої зміни фізико-механічних характеристик поверхневого шару і залишкового ресурсу зубчастих коліс при ППДЗ.

Раніше, у якості гіпотези дослідження, було сформульовано, що ефект від плазмового зміцнення визначається підвищенням експлуатаційних властивостей деталі завдяки зміні фізико-механічних характеристик поверхневого шару, внаслідок утворення специфічної структури й фазового складу металу, а також одержання на поверхні стискаючих залишкових напруг. У перехідній зоні по глибині збільшується неоднорідність структури в такій послідовності: мартенсито-троостит, мартенсит і трооститна сітка, а на границі з вихідної – перехід у феритну.

Структурні перетворення в цілому відповідають тим, що відбуваються при об'ємному загартуванні, однак, високі швидкості нагрівання й охолодження викликають зміну співвідношень між структурними складовими, зміна їх морфології внаслідок підвищеної дефектності кристалічної будови (збільшення щільності дислокацій, здрібнювання блоків, ріст напруг у кристалічних ґратах).

Формування напруг при охолодженні поверхні, підданій плазмовому зміцненню, можна представити в такий спосіб [109]. Після припинення впливу

плазмової дуги найбільше швидко охолоджується внутрішній шар металу, розташований біля непрогрітого вихідного шару, а приповерхній шар – в останню чергу. У процесі стиску при охолодженні він впливає на внутрішній шар, формуючи в ньому стискаючі напруги, у той час як на поверхні формуються розтягувальні.

При цьому в поверхневому шарі сталей мартенситне перетворення відбувається в останню чергу. Оскільки мартенсит має більший обсяг, то в приповерхньому шарі в цей час за рахунок фазових напруг відбувається розширення й виникають стискаючі напруги. У результаті величина й знак залишкових напруг $\sigma_{\text{зал}}$ залежать від співвідношення термічних $\sigma_{\text{терм}}$ і фазових $\sigma_{\text{фаз}}$ напруг з урахуванням можливих пластичних ефектів. При $\sigma_{\text{терм}} > \sigma_{\text{фаз}}$ на поверхні формуються розтягувальні напруги, а при $\sigma_{\text{терм}} < \sigma_{\text{фаз}}$ - стискаючі.

Характер і обсяг протікання перерахованих явищ залежить від теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу, швидкості відносного переміщення заготовки й джерела нагрівання, теплової потужності плазмової дуги [79]. Міняючи зазначені параметри, можна досягати збільшення ступеня прояву тієї сторони плазмового впливу на матеріал заготовки, домінування якої вважається доцільним для даного випадку.

Структура зміцненого шару, що характеризується великою твердістю й високою дисперсністю, впливає на зміну експлуатаційних характеристик зміцнених матеріалів – зносостійкість, механічні властивості (міцність, пластичність, тріщиностійкість, витривалість), тепло- і корозійну стійкість.

Специфіка гірничозбагачувального комплексу Кривбасса пов'язана з експлуатацією значної кількості великомодульних зубчастих передач. Основною проблемою при цьому є зниження їх експлуатаційного ресурсу внаслідок абразивного зношування. Розв'язати цю проблему може технологія ППДЗ зубів. Однак підприємства, що виготовляють та ремонтують зубчасті передачі не застосовують у технологічному процесі виготовлення поверхневе зміцнення внаслідок відсутності науково обґрунтованих рекомендацій для передач даного типу. Цей факт приводить до необхідності зробити дослідження

впливу параметрів ППДЗ на експлуатаційні показники великомодульних зубчастих передач.

Основною експлуатаційною властивістю коліс є контактна витривалість. Вона визначає габаритні розміри зубчастої передачі й ресурс її роботи. Крім високої контактної витривалості від зубчастих коліс потрібен достатній запас по втомній міцності при вигині й висока зносостійкість профілів і торців зубів.

Зношування шестірень може бути абразивним (від молекулярного схоплювання) і осповидним. Особливо часто в шестірень з'являється пітинг, у результаті якого на поверхні зуба виникають характерні виразки або віспини. Пояснюється це дією сильних змінних напруг стиску на поверхні зуба при їх роботі. Після декількох мільйонів циклів навантажень під поверхнею контакту зубів на невеликій глибині утворюються втомні тріщини. У результаті від поверхні зуба відділяються невеликі лусочки металу. Чим вище твердість поверхні й чим вище границя текучості серцевини зуба, тим вище межа контактної витривалості.

Підвищення межі контактної витривалості досягається зміцненням поверхневого шару, підвищенням межі міцності матеріалу, зниженням навантаження в зоні контакту, поліпшенням чистоти поверхні, а також підвищенням в'язкості мастила.

Відкриті зубчасті передачі більшою мірою схильні до абразивного зношування. Найбільший інтерес представляють дослідження спрямовані на встановлення загальних закономірностей абразивного зношування. Ряд робіт у цьому напрямку засновані на використанні методів теорії подоби [111]. Більший інтерес представляють дослідження засновані на вивченні механіки абразивного зерна в зоні контакту зубів.

Аналіз попередніх досліджень, виконаний на основі методів статистичної механіки та теорії ймовірностей, дозволив зробити подальший розвиток моделі абразивного зношування поверхонь пар тертя, зокрема важконавантажених зубчастих передач. У результаті аналіз і оцінка абразивного зношування зубів, проводяться залежно від характеристики абразивного впливу A , фізико-

механічних властивостей матеріалів $M_{1(2)}$, геометричних і кінематичних параметрів сполучень K . Тоді зношування за одне навантаження в мм [112], дорівнює

$$U_{1(2)} = 6,8 \frac{AK}{M_{1(2)}} \quad (3.5)$$

$$\text{де} \quad A = q_a^{2/3} R^{0.5} \sigma^{2.5}, \quad (3.6)$$

$$M_{1(2)} = \delta_{1(2)}^t HB_{1(2)}^{1.5} HB_{2(1)}, \quad (3.7)$$

$$K = \sqrt{\rho_{np}} \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2}, \quad (3.8)$$

Тут індекс 1 відноситься до поверхні, що зношується, а індекс 2 – до поверхні, що сполучається. Крім того,

q_a – концентрація абразивних домішок у мастилі або повітрі, %;

R – їх середній радіус, мм;

σ – межа міцності, МПа;

$\delta_{1(2)}$ – характеристика пластичності поверхневих – відносне подовження при розриві;

t – коефіцієнт контактної-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 крапці контакту), мм;

V_1, V_2 – швидкості ковзання поверхонь, що сполучаються, м/с.

Виражаючи K через параметри евольвентної передачі, запишемо

$$K = \left[\frac{2m \cdot (z_1 + z_2) \cdot \sin \alpha_w}{\cos \beta} \right]^{0.5} \cdot y_n, \quad (3.9)$$

де m – модуль, мм;

z_1, z_2 – числа зубів шестірні й колеса;

α_w – кут зачеплення;

β – кут нахилу зубів;

y_n – коефіцієнт, що характеризує розподіл зношування по профілю зубів, середнє значення якого для робочої ділянки профілю дорівнює:

$$y_n = \frac{y_{n1} \cdot \left(\frac{1}{U+1} - \chi_1 \right) + y_{n2} \cdot \left(\chi_2 - \frac{1}{U+1} \right)}{2(\chi_2 - \chi_1)}. \quad (3.10)$$

Величини χ_1, χ_2 , визначають точки початку й кінця робочої ділянки зачеплення

$$\chi_1 = 1 - \frac{\sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2}}{2 \cdot \alpha_w \cdot \sin \alpha_w}, \quad \chi_2 = \frac{\sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2}}{2 \cdot \alpha_w \cdot \sin \alpha_w} \quad (3.11)$$

де d_{a1}, d_{a2} – діаметри виступів окружностей;

d_{b1}, d_{b2} – діаметри основних окружностей;

α_w – міжосьова відстань

Значення y_{n1}, y_{n2} у вираженні (3.10) визначаються при підстановці χ_1, χ_2 у формулу

$$y_{n1(2)} = \sqrt{\chi(1-\chi)} \cdot \frac{\chi - (1-\chi) \cdot U}{\chi + (1-\chi) \cdot U} \frac{1}{\chi}, \quad (3.12)$$

де U – передаточне число.

Кількісне порівняння розрахункових значень швидкостей зношування з дослідними даними для умов незначного розкиду розмірів абразивних часток і відносно невеликої їх концентрації в змащенні ($q_a = 1,85 - 6 \%$) показала розбіжність не більш 30-60%.

Змащення відкритих зубчастих передач містить відносно високу концентрацію механічних домішок, частки яких різко відрізняються за розмірами. У процесі зношування мають місце значні пластичні деформації поверхонь тертя, що спотворюють профілі зубів. Крім того, відомо, що в процесі зношування, залежно від температури, тиску, умов деформацій змінюються фізико-механічні властивості структури, що формується в процесі, роботи пар тертя, які можуть суттєво відрізнятися від початкових [113].

Поряд із пластичними деформаціями, викривлення початкових профілів зубів відбувається з ростом величини зношування зубів, що обумовлює мінливість параметра, що характеризує кінематику й геометрію зачеплення.

Зазначені особливості абразивного зношування відкритих зубчастих передач рудорозмельних млинів не дозволяє безпосередньо використовувати вираження (3.18) для визначення швидкості зношування зубів без відповідного експериментального уточнення.

Як визначається вище, зі зношуванням робочих поверхонь зубів змінюються геометричні й кінематичні параметри зубчастого зачеплення, що впливають на інтенсивність зношування, динамічні навантаження й міцність зубчастого зачеплення.

Ґрунтуючись на аналітичні залежності абразивного зношування, поряд з експериментальними, виконані теоретичні дослідження розподілу зношування по профілю зуба і його вплив на основні параметри зачеплення [114]. У результаті отримані важливі висновки про вплив зношування на динаміку й вигинну міцність зубчастого зачеплення при абразивному зношуванні.

3.2. Оптимізація параметрів процесу підвищення зносостійкості зубчастих передач

Оптимізація параметрів ППДЗ зубчастих коліс пов'язана, насамперед, з визначенням оптимального терміну служби відкритих зубчастих передач за економічними показниками. У якості критерію оптимізації виступають сумарні середні річні втрати, пов'язані з експлуатацією, ремонтом і урахуванням вартості зубчастих коліс

$$C = \frac{k}{x} C_0 + C_B x^{n-1}, \quad \left(x = \frac{T}{T_0} \right), \quad (3.13)$$

де C_0 – середні річні втрати внаслідок ремонтних простоїв і оплатою на відновлення функціонування, грн,

C_B – вартість зубчастого колеса, виготовленого з базового (прийнятого для порівняння) матеріалу, грн,

k – середня кількість відмов у роботі зубчастих коліс, рік⁻¹,

T_0 – середній термін експлуатації зубчастого колеса, виготовленого з базового матеріалу, рік,

T – середній термін експлуатації зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ, рік,

n – показник, що характеризує збільшення вартості зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ ($n > 1$).

Надалі, для зручності розв'язку поставленого завдання доцільно привести функцію (3.13) до безрозмірного виду

$$\hat{C} = \frac{k}{x} \hat{C}_0 + x^{n-1}, \quad (3.14)$$

$$\text{де } \hat{C} = \frac{C}{C_B}, \quad \hat{C}_0 = \frac{C_0}{C_B}.$$

Розв'язок завдання оптимізації параметрів процесу ППДЗ зубчастих коліс зводиться до мінімізації функції (3.14).

Згідно з необхідною умовою існування екстремуму функцію можна записати [127]

$$\frac{d\hat{C}}{dx} = -\frac{k}{x^2} \hat{C}_0 + (n-1)x^{n-2} = 0. \quad (3.15)$$

Вирішуючи рівняння (3.15), знаходимо

$$x_0 = \sqrt[n]{\frac{k\hat{C}_0}{n-1}}. \quad (3.16)$$

Для встановлення характеру екстремуму скористаємося достатньою умовою існування екстремуму, для цього обчислимо похідну другого порядку й визначимо її знак у стаціонарній точці

$$\frac{d^2\hat{C}}{dx^2} = \frac{2k}{x^3} \hat{C}_0 + (n-1)(n-2)x^{n-3},$$

або

$$\frac{d^2\hat{C}}{dx^2} = \frac{1}{x^3} (2k\hat{C}_0 + (n-1)(n-2)x^n). \quad (3.17)$$

Поставляючи (3.16) у формулу (3.17), знаходимо

$$\left. \frac{d^2\hat{C}}{dx^2} \right|_{x=x_0} = \frac{1}{x_0^3} (2k\hat{C}_0 + (n-1)(n-2) \frac{k\hat{C}_0}{n-1}),$$

або

$$\left. \frac{d^2 \hat{C}}{dx^2} \right|_{x=x_0} = \frac{k \cdot n \cdot \hat{C}_0}{x_0^3 (n-1)} > 0. \quad (3.18)$$

Тому що виконується умова (3.18), то стаціонарна точка (3.16) є точкою мінімуму функції (3.14). Мінімальне значення функції (3.14) знаходиться шляхом підстановки значення (3.16)

$$\hat{C}_{\min} = \hat{C}(x_0) = \frac{k}{x_0} \hat{C}_0 + x_0^{n-1},$$

або, послідовно перетворюючи,

$$\hat{C}_{\min} = \frac{1}{x_0} (k \hat{C}_0 + x_0^n), \quad \hat{C}_{\min} = \sqrt[n]{\frac{n-1}{k \hat{C}_0}} \left(k \hat{C}_0 + \frac{k \hat{C}_0}{n-1} \right), \quad \hat{C}_{\min} = \sqrt[n]{\frac{n-1}{k \hat{C}_0}} \frac{n k \hat{C}_0}{n-1},$$

і, остаточно,

$$\hat{C}_{\min} = k \cdot n \left(\frac{\hat{C}_0}{n-1} \right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (3.19)$$

На рис. 3.3 представлені графіки, розраховані за формулою (3.14).

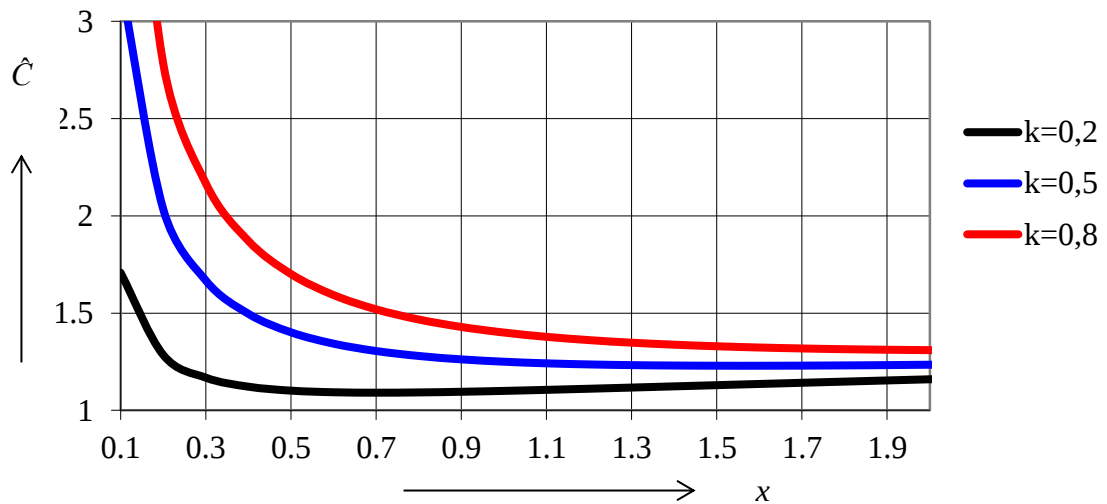


Рис. 3.3. Залежність відносних сумарних річних втрат від відносного терміну експлуатації зубчастих коліс, що пройшли ППДЗ ($\hat{C}_0 = 0,5$, $n = 1,15$)

Аналіз графіків, наведених на рис. 3.3, 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 термін експлуатації зубчастих коліс, що пройшли ППДЗ.

На рис. 3.4 представлені графіки, розраховані по формулі (3.16).

Аналіз графіків, наведених на рис. 3.4, показує, що при збільшенні показника, що характеризує ріст вартості зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ, оптимальний термін експлуатації зубчастих коліс зменшується. Крім того, при збільшенні відносного числа відмов у роботі зубчастого колеса зростає оптимальний термін експлуатації зубчастих коліс, що пройшли ППДЗ.

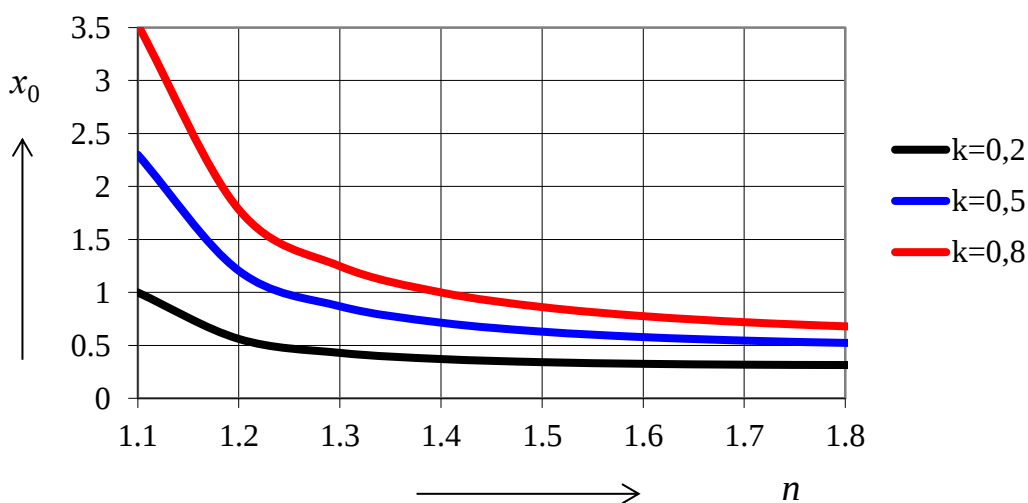


Рис. 3.4. Залежність оптимального відносного терміну експлуатації зубчастих коліс від показника, що характеризує ріст вартості зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ ($\hat{C}_0 = 0,5$)

На рис. 3.5 представлені графіки, розраховані по формулі (3.19).

Аналіз графіків, наведених на рис. 3.4, показує, що залежність мінімальних відносних середніх річних втрат від показника, що характеризує ріст вартості зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ, носить екстремальний характер. Існує оптимальна величина показника, при якій мінімальні сумарні середні річні втрати досягають найбільшого значення. Крім того, при збільшенні відносного числа відмов у роботі зубчастого колеса ці найбільші мінімальні сумарні середні річні втрати зростають.

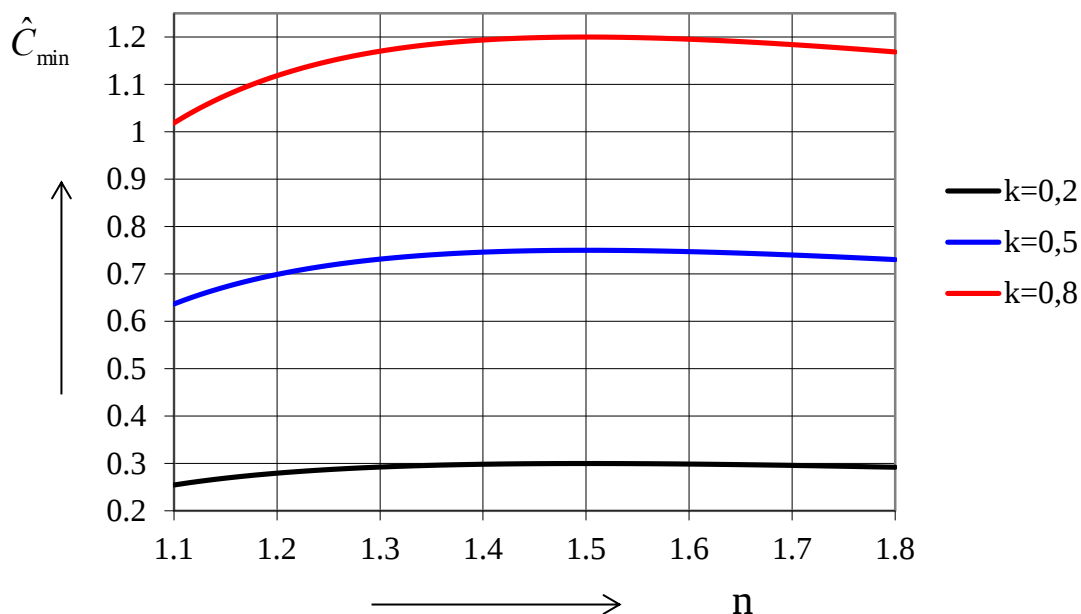


Рис. 3.5. Залежність мінімальних відносних середніх річних втрат від показника, що характеризує ріст вартості зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ ($\hat{C}_0 = 0,5$).

Проведений аналіз функції (3.14) дозволив установити залежність критерію оптимізації від часу експлуатації зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ. Це дозволяє зробити висновок, що час експлуатації зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ, є фактором, що впливає на критерій оптимізації. У свою чергу, час експлуатації зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ, визначається параметрами нагрівання при ППДЗ. Тому природно порушити питання про вибір таких параметрів нагрівання при ППДЗ зубчастого колеса, які забезпечили б оптимальний час експлуатації цього колеса.

3.3. Математичне моделювання процесів поверхневого плазмово-дугового зміцнення великомодульних зубчастих коліс

Аналіз процесів, що протікають при ППДЗ заготовок зубчастих коліс, показав виняткову складність структурно-фазових перетворень матеріалу заготовок. У зв'язку із цим особливу роль здобувають методи математичного

моделювання, що дозволяє шляхом побудови й застосування формалізованих моделей, досліджувати особливості процесу ППДЗ. Найважливішим стимулом для реалізації методів математичного моделювання є можливість застосування сучасної комп'ютерної техніки з розвиненим математичним забезпеченням з метою організації обчислювальних експериментів [128]. Разом з тим, необхідно підкреслити, що складність процесів ППДЗ не дозволяє ефективно скористатися арсеналом детермінованих математичних моделей, оскільки їх побудова пов'язана з необхідністю обліку впливу великої кількості факторів, частина з яких не піддається контролю, що утрудняє повне теоретичне дослідження задачі [129]. Тому представляється доцільним розглядати процес ППДЗ як стохастичний, що дає можливість застосувати експериментально-статистичні методи моделювання [130]. При цьому експеримент стає джерелом інформації, а методи теорії ймовірностей і математичної статистики – основним засобом математичного моделювання. Шляхом обробки дослідних даних методами регресійного й кореляційного аналізу знаходиться залежність між змінними й умови оптимуму, обумовлені функцією відгуку.

У загальному випадку, функція відгуку зв'язує параметр оптимізації зі змінними шляхом синтезу відповідної математичної моделі, обумовленої в статичному випадку деякою функцією

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3.20)$$

де y – параметр оптимізації,

$x_1, x_2, \dots, x_n$ – незалежні змінні (фактори).

При цьому простір, обумовлений факторами $x_1, x_2, \dots, x_n$, називається факторним простором, а геометричне зображення функції відгуку у факторному просторі – поверхнею відгуку.

Згідно з розглянутою задачею оптимізації функцією відгуку є критерій оптимізації (3.14), який залежить від часу експлуатації зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ, а варіюємими факторами, що визначають час експлуатації зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ, – швидкість переміщення джерела нагрівання й сила струму плазмової дуги, тобто

$$C = f(x),$$

$$x = \varphi(V; I), \quad (3.21)$$

де V – швидкість переміщення джерела нагрівання, мм/хв ,

I – сила струму плазмової дуги, А .

Таким чином, визначивши по формулі (3.16) оптимальну величину часу експлуатації зубчастого колеса, що пройшов ППДЗ, по формулі (3.21) можуть бути знайдені оптимальні величини факторів V і I шляхом розв'язку рівняння

$$\sqrt[n]{\frac{k\hat{C}_0}{n-1}} = \varphi(V; I). \quad (3.22)$$

Експериментально-статистичні методи дозволяють синтезувати математичну модель, що визначає функціональний зв'язок, виражену формулою (3.21). Експериментально-статистичні методи математичного моделювання природно розділити по способу збору експериментальних даних на активний і пасивний експерименти [131, 132, 133]. Кожній комбінації способу експерименту й мети моделювання відповідають певні математичні методи. Зокрема, при пасивному експерименті для побудови математичних моделей використовуються методи кореляційного й регресійного аналізу й ін., а при активному експерименті – методи факторного експерименту, рототабельного центрального композиційного планування й ін. Проведена класифікація експериментально-статистичних методів не є остаточною, хоча частково характеризує ступінь розробленості методів опису досліджуваних процесів і їх різноманітність. Тому природно розглянути дієвість застосування згаданих методів при дослідженні процесів ППДЗ.

При пасивному експерименті реалізується спостереження за об'єктом моделювання без втручання в його функціонування. Зрозуміло, що для одержання в даних умовах потрібної інформації потрібно значний час використовувати метод спостереження. Необхідність пасивного спостереження пов'язана ще й з тим, що об'єкти, які експлуатуються, наприклад, у виробничих умовах, не допускають експериментів з ними. Тому експерименти на виробництві, яких не можна уникнути, слід проводити, мінімально обурюючи

об'єкт моделювання, але так, щоб одержати максимальну інформацію про його властивості. Тому наступним природнім кроком є планування експерименту, тобто реалізація активного експерименту. Беручи до уваги, що дослідження процесів ППДЗ базується на організації активного експерименту, доцільно розглянути його більш докладно.

Введення в процес експериментування активного початку внесло в побудову математичних моделей стохастичних процесів значні перспективи [134]. Ідеї планування експерименту дали можливість по-новому підійти до використання експериментів. Інтуїтивний, «вольовий» підхід до організації експерименту поступився місцем науково обґрунтованій програмі проведення експериментального дослідження, результати якого на всіх етапах можуть бути підтверджені статистичними оцінками. Важливим моментом є також те, що основна мета експериментальних досліджень, що полягає в знаходженні такої сукупності факторів, при яких цільова функція, що оптимізується приймає екстремальне значення, досягається за допомогою мінімально можливого числа дослідів. Необхідно підкреслити, що методи теорії планування експерименту дають можливість реалізувати системний підхід у вивченні складних явищ замість традиційного однофакторного, однобічного підходу.

Розв'язок завдання оптимізації на основі планування експерименту можна проводити за допомогою двох принципово різних підходів:

- якщо математичний опис відсутнє, то здійснюється експериментальний пошук області оптимуму,
- якщо відома математична модель для тієї частини факторного простору, де розташований екстремум функції відгуку, то завдання оптимізації можна розв'язати аналітично або чисельним методом.

При розв'язку поставленого завдання оптимізації було прийнято рішення застосувати послідовно два підходи. На першому етапі проводився експериментальний пошук області оптимуму шляхом варіювання двома факторами – V і I . Для реалізації такого пошуку застосовуються методи, серед яких можна виділити: метод Гаусса-Зейделя (метод покоординатного спуску),

градієнтні методи (звичайний, Кифера-Вольфовиця), метод крутого сходження (Бокса-Уилсона), симплекс-метод, метод випадкового пошуку [135]. Важливо підкреслити, що на точність виходу в область оптимуму впливають погрішності, пов'язані з вимірами. Крім того, ефективність названих вище методів пошуку області оптимуму багато в чому залежить від конкретних умов, зокрема, від форми поверхні відгуку.

Аналіз особливостей розв'язуваного завдання (мала розмірність), а також наявність комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням дозволили зробити висновок про доцільність застосування симплекс-методу для пошуку області оптимуму шляхом мінімізації нев'язки рівняння (3.22). При розв'язку завдання на площині (у нашому випадку, дві змінні V й I) симплексом є трикутник. Особливістю симплексного методу є те, що він дозволяє сполучати пробні дослідження для визначення напрямку руху з робочим рухом по поверхні відгуку до області оптимуму. У розглянутому двохфакторному просторі проводяться дослідження в трьох вершинах трикутника, потім по величинах відгуку у вершинах можна судити, у якому напрямку слід рухатися, щоб наблизитися до екстремуму. З цією метою реалізується переміщення симплекс-трикутника у факторному просторі шляхом дзеркального відображення вершини, що має максимальне значення відгуку. Досягнувши області екстремуму, трикутник починає обертання навколо вершини з мінімальним значенням відгуку.

Алгоритм симплекс-методу у випадку двох факторів для розв'язку розглянутого завдання реалізується за схемою:

1. Спочатку вибирається початкова точка A_1 , а також інтервали варіювання для факторів ΔV і ΔI .

2. Вибирається безрозмірна довжина сторони симплекс-трикутника у відносних одиницях стосовно інтервалів варіювання ΔV й ΔI (звичайно, ця довжина дорівнює одиниці). Для спрощення розв'язку одержуваний симплекс-трикутник у безрозмірних одиницях повинен бути рівностороннім.

3. Обчислюються координати інших двох вершин початкового симплекса-трикутника. Для цього одна сторона розташовується по осі фактора

I , починаючи з початкової точки A , прийнятої за початок координат. Відстань між двома вершинами симплекс-трикутника (в одиницях варіювання факторів) приймаються рівними одиниці. У цьому випадку висота симплекс-трикутника буде рівна 0,86.

4. У вершинах симплекс-трикутника виконуються спостереження й порівнюються відгуки по величині згідно з нев'язці

$$\sqrt[n]{\frac{k\hat{C}_0}{n-1}} - \varphi(V; I). \quad (3.23)$$

Далі, вибирається вершина симплекс-трикутника з максимальним відгуком по величині нев'язки (3.23) і відбивається відносно протилежної сторони, що дає вершину наступного симплекса-трикутника. Координати відбитої вершини обчислюються по формулі

$$x_{il,k+1} = x_{i1k} + x_{i2k} + x_{i3k} \pm x_{ilk}, \quad (3.24)$$

де i – номер фактора ($i=1,2$), l – номер вершини k – ого симплекс-трикутника, де має місце максимальний відгук, $k+1$ – номер наступного симплекс-трикутника, що містить відбиту вершину.

5. Ставиться експеримент у відбитій вершині нового симплекс-трикутника й відгук у ній порівнюється з відгуками в інших двох вершинах, потім знову вибирається вершина з максимальним відгуком і відбивається через протилежну сторону симплекс-трикутника згідно з формулою (3.24). Якщо в новій вершині $(k+1)$ – ого симплекс-трикутника відгук виявився знову максимальним, то вертаються до k – ого симплекс-трикутника й відбивається друга по максимальній величині вершина.

6. Експеримент триває доти, поки симплекс-трикутник не зробить повний оберт навколо однієї з вершин.

Розглянемо застосування симплекс-методу для знаходження області оптимуму за конкретним даними для факторів V і I . Для знаходження оптимальної області по двом факторам (V і I) була організована спеціальна серія експериментів, що реалізує пошук за допомогою симплекса-методу.

Експерименти проводилися при наступних незмінних параметрах:

- діаметр сопла плазмотрона 6 мм,
- витрата плазмоутворюючого газу 3 м³/год,
- розмір опорної плями нагрівання – 10 мм × 40 мм.

Для розв'язку завдання були обрані параметри $n=1,15$, $k=0,5$, $\hat{C}_0=0,5$. Тоді, згідно (3.16),

$$x_{opt} = \sqrt[1,15]{\frac{0,5 \cdot 0,5}{1,15 - 1}} = 1,56. \quad (3.25)$$

У результаті нев'язки (3.23) запишеться у вигляді

$$1,56 - \varphi(V; I). \quad (3.26)$$

Базові значення й інтервали варіювання факторів визначалися за результатами попередніх дослідів. Так, нижній рівень варіювання фактора V вибирався з умови відсутності оплавлення бічної поверхні зуба колеса. Верхній рівень цього фактора обмежувався як можливостями обладнання, так і повинен був забезпечити умови по необхідному припливу тепла для протікання структурно-фазових перетворень у шарі, що нагрівається, поверхні зуба колеса. Інтервал варіювання фактора I вибирався з умови впливу температури підігріву поверхні зуба колеса на глибину структурно-фазових перетворень. Оскільки фактори досліджуваного процесу мають різні одиниці виміру, то доцільно привести їх до єдиної системи числення шляхом переходу від дійсних значень до кодованих. Для фактора знаходять початок відліку, що визначається як основний рівень фактора, і інтервал варіювання, відповідно, по формулах

$$x_0 = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}, \quad \Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}, \quad (3.27)$$

де $x_{\min}$, $x_{\max}$ – нижній і верхній рівні фактора.

Тоді кодоване значення фактора обчислюється по формулі

$$X = \frac{x - x_0}{\Delta x}. \quad (3.28)$$

Базові значення й інтервали варіювання факторів представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Базові значення й інтервали варіювання факторів

Фактори	Позначення (кодовані)	Основний рівень	Інтервали варіювання
Швидкість переміщення джерела нагрівання, мм/хв	X_1	400	50
Сила струму плазмової дуги, А	X_2	200	50

Двовимірний симплекс являє собою рівносторонній трикутник ABC (рис. 3.6). На рис. 3.6 показано схему руху симплекс-трикутника в напрямку оптимуму в результаті реалізації серії експериментів.

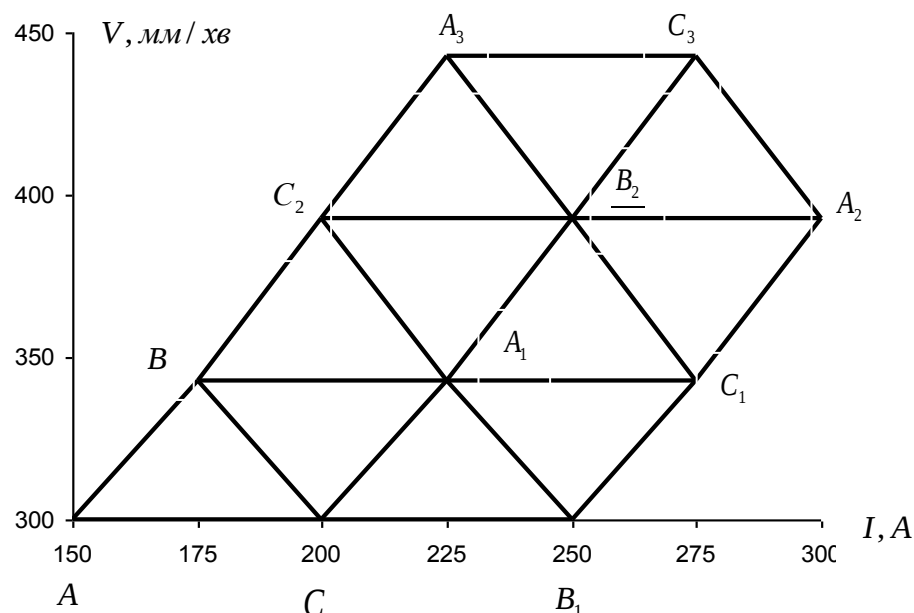


Рис. 3.6. Схема руху симплекс-трикутника при пошуку оптимальної області в ході попередніх експериментів по ППДЗ сталі 40Х

Послідовний рух симплекса-трикутника, представлено в табл. 3.2, показує, що найменша нев'язка досягається в точці B_2 . Після цього симплекс-трикутник починає обертання навколо цієї точки, що є ознакою завершення процесу оптимізації (рис. 3.6). Відповідний до цієї точки режим $V = 393$ мм/хв, і $I = 250$ А і визначає в межах обраних інтервалів варіювання оптимальну область.

Таблиця 3.2

**Реалізація симплекс-методу для визначення оптимальних режимів ППДЗ
сталі 40Х**

№	Симплекс	Вершина, де ставиться дослід	Сила струму плазмової дуги		Швидкість переміщенн я джерела нагрівання		Час експлуатації зубчастого колеса		Величина нев'язки
			код	A	код	мм/хв	T, год.	x, відн.од.	
1	ABC	A	0	150	0	300	6050	0,91	– 0,65
2	ABC	B	0,5	175	0,86	343	6150	0,92	– 0,64
3	ABC	C	1	200	0	300	7350	1,16	– 0,46
4	BCA ₁	A ₁	1,5	225	0,86	343	6475	0,97	– 0,59
5	CA ₁ B ₁	B ₁	2	250	0	300	12100	1,82	+ 0,26
6	A ₁ B ₁ C ₁	C ₁	2,5	275	0,86	343	15320	2,30	+ 0,74
7	A ₁ C ₁ B ₂	B ₂	2	250	1,72	393	9954	1,49	– 0,07
8	A ₁ B ₂ C ₂	C ₂	1	200	1,72	393	6650	1,00	– 0,56
9	C ₁ B ₂ A ₂	A ₂	3	300	1,72	393	16250	2,44	+ 0,88
10	B ₂ A ₂ C ₃	C ₃	2,5	275	2,58	443	13150	1,97	+ 0,41
11	B ₂ C ₃ A ₃	A ₃	1,5	225	2,58	443	6570	1,56	– 0,57

Необхідно підкреслити переваги симплекс-методу, що дозволяють ефективно використовувати при розв'язку розглянутого завдання:

- досить висока завадостійкість при виборі напрямку руху екстремуму;
- вивчення поверхні відгуку сполучається з одночасним рухом до екстремуму;
- при оптимально обраному розмірі симплекса забезпечується висока швидкість виходу в область екстремуму.

Разом з тим, симплекс-метод має ряд недоліків: відносна складність обчислення вершин симплекса; метод не дозволяє одержувати математичний опис досліджуваного ділянки поверхні відгуку.

Останнє зауваження є важливим, оскільки для уточнення координат оптимальної точки необхідно прибігати до інших методів пошуку.

В околиці оптимуму лінійного наближення недостатньо, оскільки зменшення кроку при пошуку екстремуму неефективно через вплив перешкод. Тому для опису околиці екстремуму, що є майже стаціонарною областю,

застосовуються поліноми другого порядку. Для цього треба мати таку систему планування, у якій кожна змінна приймала б хоча б три різні значення. Таке планування може бути отримане шляхом додавання деякої кількості спеціально розташованих точок до сукупності точок, утворених плануванням для лінійного наближення. У результаті такі плани називаються композиційними, а саме планування центральним композиційним плануванням (ЦКП). Найбільше широко в інженерній практиці для опису області оптимуму застосовується метод центрального композиційного рототабельного планування (ЦКРП). Доцільно більш докладно розглянути особливості ЦКРП. При плануванні за допомогою цього методу необхідно зробити вибір нульової точки, числа рівнів і принципу оптимальності. У якості нульової точки природно вибрати центр раніше використаного плану, наприклад, при реалізації симплекса-методу. При використанні математичної моделі у вигляді полінома другого порядку для знаходження коефіцієнтів полінома двох рівнів варіювання факторів буде недостатньо. Тому дворівневий план ПФЕ доповнюється певними точками факторного простору, але так, щоб одержати оптимальний план. Беручи до уваги, що при розв'язку завдання враховуються тільки два фактори, ядро ЦКП становить ПФЕ типу 2^2 . Далі план ПФЕ доповнюється деякою кількістю зоряних точок, координати яких залежать від принципу оптимальності. Загальна кількість дослідів при такому плануванні визначиться:

$$N = N_{\phi} + N_{\alpha} + n_0, \quad (3.29)$$

де N_{ϕ} – число точок ПФЕ,

N_{α} – число зоряних точок,

n_0 – число центральних точок.

У методі ЦКРП принципом оптимальності є умова рототабельності, що забезпечує рівномірне одержання інформації в досліджуваному факторному просторі. При цьому експериментальні точки в центрі плану забезпечують сталість і незалежність дисперсії передбаченого значення від відстані до центру плану усередині області, де проводяться досліді, що визначається величиною, використовуюваного в розрахунках, параметра

$$\lambda = \frac{nN}{(n+2)(N-n_0)}. \quad (3.30)$$

Зоряні точки будуються на осях координат факторів, і для ПФЕ типу 2^n відстань від зоряної точки до початку координат (зоряне плече) знаходиться по формулі

$$\alpha = 2^{\frac{n}{4}}. \quad (3.31)$$

Для розв'язуваної двохфакторного завдання ($n = 2$) має місце

$$N_\phi = 2^n = 4, N_\alpha = 2n = 4, n_0 = 5, N = 13, \alpha = 2^{\frac{n}{4}} = \sqrt{2}.$$

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

$$\hat{x} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_1^2 + a_4 X_2^2 + a_5 X_1 X_2, \quad (3.32)$$

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

Матриця планування й результати експериментів наведені в табл. 3.3.

Якщо ввести позначення

$$X_1^2 = X_3, X_2^2 = X_4, X_1 X_2 = X_5,$$

то рівняння (3.32) запишеться у вигляді лінійної форми від п'яти змінних

$$\hat{x} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5. \quad (3.33)$$

Для знаходження невідомих коефіцієнтів, що входять у рівняння (3.32), природно скористатися методом найменших квадратів, який містить вимогу мінімуму суми квадратів відхилень вихідного параметра математичної моделі й результатів експериментів [9]. Аналітично ця вимога записується так

$$F(a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) = \sum_{j=1}^N (x_j - a_0 - \sum_{i=1}^5 a_i X_{ij})^2 \rightarrow \min_{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5}, \quad (3.34)$$

де N – число експериментальних даних.

Застосування принципу найменших квадратів дозволяє досить просто проводити обчислення й одержувати результати з необхідною точністю при достатньому числі експериментальних даних.

Таблиця 3.3

Матриця планування й результати експериментів

№	Матриця планування						Результати дослідів
	X_0	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	$X_1 X_2$	x
1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	0,76
2	+1	-1	+1	+1	+1	-1	1,63
3	+1	+1	-1	+1	+1	-1	0,70
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1,45
5	+1	$-\sqrt{2}$	0	2	0	0	1,19
6	+1	$+\sqrt{2}$	0	2	0	0	0,99
7	+1	0	$-\sqrt{2}$	0	2	0	0,65
8	+1	0	$+\sqrt{2}$	0	2	0	1,71
9	+1	0	0	0	0	0	1,13
10	+1	0	0	0	0	0	1,08
11	+1	0	0	0	0	0	1,12
12	+1	0	0	0	0	0	1,15
13	+1	0	0	0	0	0	1,07

Процедура знаходження коефіцієнтів рівняння (3.33) зводиться до задачі визначення функції (3.34). Необхідною умовою мінімуму функції декількох змінних, що диференціюється є рівність нулю окремих похідних за коефіцієнтами багаточлена (3.33)

$$\frac{\partial F}{\partial a_0} = -2 \sum_{j=1}^N (x_j - a_0 - \sum_{i=1}^5 a_i X_{ij}) = 0, \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial F}{\partial a_k} = -2 \sum_{j=1}^N (x_j - a_0 - \sum_{i=1}^5 a_i X_{ij}) X_{kj} = 0, \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5). \quad (3.36)$$

Після перетворень умови (5.23), (5.24) запишуться у вигляді системи нормальних рівнянь

$$N \cdot a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i \sum_{j=1}^N X_{ij} = \sum_{j=1}^N x_j,$$

$$a_0 \sum_{j=1}^N X_{kj} + \sum_{i=1}^5 a_i \sum_{j=1}^N X_{ij} X_{kj} = \sum_{j=1}^N X_{kj} x_j, \quad (k = 1, 2, 3, 4, 5),$$

Отримана система рівнянь є лінійною алгебраїчною, тому зручно для подальшого розв'язку скористатися методами матричної алгебри [136]. Для цього, користуючись даними табл. 3.3, введемо в розгляд матриці

$$X = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -\sqrt{2} & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & \sqrt{2} & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} - \text{матриця факторів,} \quad Y = \begin{pmatrix} 0,76 \\ 1,63 \\ 0,70 \\ 1,45 \\ 1,19 \\ 0,99 \\ 0,65 \\ 1,71 \\ 1,13 \\ 1,08 \\ 1,12 \\ 1,15 \\ 1,07 \end{pmatrix} - \text{вектор-стовпець}$$

спостережень,

$$A = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{pmatrix} - \text{вектор-стовпець невідомих коефіцієнтів.}$$

Матричний запис системи нормальних рівнянь приймає вид

$$(X^T X)A = X^T Y. \quad (3.37)$$

Тоді розв'язок (3.37) запишеться у вигляді

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (3.38)$$

Послідовно знаходимо

$$X^T X = \begin{pmatrix} 13 & 0 & 0 & 8 & 8 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 12 & 4 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 4 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}, \quad X^T Y = \begin{pmatrix} 14,63 \\ -0,523 \\ 3,119 \\ 8,9 \\ 9,26 \\ -0,12 \end{pmatrix}, \quad (X^T X)^{-1} = \begin{pmatrix} 0,2 & 0 & 0 & -0,1 & -0,1 & 0 \\ 0 & 0,125 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,125 & 0 & 0 & 0 \\ -0,1 & 0 & 0 & 0,144 & 0,019 & 0 \\ -0,1 & 0 & 0 & 0,019 & 0,144 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,25 \end{pmatrix} \quad (3.39)$$

Тоді, згідно (3.38) з урахуванням (3.39), одержуємо

$$A = \begin{pmatrix} 1,11 \\ -0,065 \\ 0,389 \\ -0,01 \\ 0,035 \\ -0,03 \end{pmatrix}. \quad (3.40)$$

Після обчислення коефіцієнтів рівняння регресії необхідно провести статистичний аналіз цього рівняння. При використанні рототабельних планів другого порядку не потрібно проводити додаткові паралельні досліди для оцінки дисперсії відтворюваності. Це пов'язане з тим, що в центрі плану проводяться паралельні досліди, за результатами яких обчислюється дисперсія відтворюваності. Значимість коефіцієнтів рівняння регресії перевіряється за допомогою критерію Стюдента. Для цього згідно з даними табл. 3.3 по паралельних дослідах у центрі плану знаходимо дисперсію відтворюваності

$$s_B^2 = 0,00115 \quad (3.41)$$

з числом ступенів волі $k = n_0 - 1 = 4$.

Далі, користуємося формулою для знаходження вибіркової дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії

$$s_{a_j}^2 = c_{jj} s_B^2, \quad (3.42)$$

де c_{jj} – діагональні елементи кореляційної матриці $(X^T X)^{-1}$.

Підставляючи відповідні елементи матриці (3.39) і величину (3.41) у формулу (3.42), послідовно знаходимо

$$\begin{aligned} s_{a_0}^2 &= 0,2 \cdot 0,00115 = 0,00023 & s_{a_0} &= 0,015 \\ s_{a_1}^2 &= 0,125 \cdot 0,00115 = 0,000144 & s_{a_1} &= 0,012 \\ s_{a_2}^2 &= 0,125 \cdot 0,00115 = 0,000144 & s_{a_2} &= 0,012 \\ s_{a_3}^2 &= 0,144 \cdot 0,00115 = 0,000166 & s_{a_3} &= 0,013 \\ s_{a_4}^2 &= 0,144 \cdot 0,00115 = 0,000166 & s_{a_4} &= 0,013 \\ s_{a_5}^2 &= 0,25 \cdot 0,00115 = 0,000287 & s_{a_5} &= 0,017 \end{aligned} \quad (3.43)$$

Для застосування критерію Стюдента користуємося відношенням

$$t_j = \frac{|a_j|}{s_{a_j}}. \quad (3.44)$$

Підставляючи елементи вектор-стовпця (3.40) і значення (3.43) у формулу (3.44), знаходимо

$$\begin{aligned} t_0 &= \frac{1,11}{0,015} = 73,19, & t_1 &= \frac{0,065}{0,012} = 5,45, & t_2 &= \frac{0,389}{0,012} = 32,52, \\ t_3 &= \frac{0,01}{0,013} = 0,78, & t_4 &= \frac{0,035}{0,013} = 2,72, & t_5 &= \frac{0,03}{0,017} = 1,77. \end{aligned}$$

Табульоване значення критерію Стюдента для рівня значимості $\alpha = 0,1$ й числа ступенів свободи $k = 4$ становить $t_{0,1}(4) = 2,132$. Незначущими виявилися коефіцієнти, для яких відношення менше табульованого значення, тобто a_3 ($t_3 = 0,78 < t_{0,1}(4) = 2,132$) і a_5 ($t_5 = 1,77 < t_{0,1}(4) = 2,132$). Після їх виключення з рівняння регресії (3.33), необхідно перерахувати коефіцієнти рівняння регресії, враховуючи неортогональність матриці (3.39). Структура рівняння регресії приймає вид

$$\hat{x} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_2^2. \quad (3.45)$$

Користуючись методами матричної алгебри, записуємо скоректовані вихідні дані

$$X' = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -\sqrt{2} & 0 & 0 \\ 1 & \sqrt{2} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -\sqrt{2} & 2 \\ 1 & 0 & \sqrt{2} & 2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}.$$

Тоді матричний запис системи нормальних рівнянь приймає вид

$$(X'^T X')B = X'^T Y. \quad (3.46)$$

Розв'язок рівняння (3.46) запишеться у вигляді

$$B = (X'^T X')^{-1} X'^T Y. \quad (3.47)$$

Послідовно знаходимо

$$X'^T X' = \begin{pmatrix} 13 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 12 \end{pmatrix}, X'^T Y = \begin{pmatrix} 14,63 \\ -0,523 \\ 3,119 \\ 9,26 \end{pmatrix}, (X'^T X')^{-1} = \begin{pmatrix} 0,13 & 0 & 0 & -0,087 \\ 0 & 0,125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,125 & 0 \\ -0,087 & 0 & 0 & 0,141 \end{pmatrix}. \quad (3.48)$$

Тоді, згідно (5.35) з урахуванням (5.36), отримуємо

$$B = \begin{pmatrix} 1,103 \\ -0,065 \\ 0,390 \\ 0,036 \end{pmatrix}. \quad (3.49)$$

Значимість коефіцієнтів рівняння регресії (3.49) перевіряється за допомогою критерію Стюдента. Із цією метою по формулі (3.42) з урахуванням (3.41) і значень діагональних елементів кореляційної матриці (3.48) знаходимо вибіркові дисперсії коефіцієнтів регресії (3.49)

$$\begin{aligned} s_{b_0}^2 &= 0,13 \cdot 0,00115 = 0,00015 & s_{b_0} &= 0,0122 \\ s_{b_1}^2 &= 0,125 \cdot 0,00115 = 0,000144 & s_{b_1} &= 0,012 \\ s_{b_2}^2 &= 0,125 \cdot 0,00115 = 0,000144 & s_{b_2} &= 0,012 \\ s_{b_3}^2 &= 0,141 \cdot 0,00115 = 0,000162 & s_{b_3} &= 0,0128 \end{aligned} \quad (3.50)$$

Підставляючи елементи вектор-стовпця (3.49) і значення (3.50) у формулу (3.44), знаходимо відношення для порівняння із граничною величиною критерію Стюдента

$$t_0 = 90,1, \quad t_1 = 5,45, \quad t_2 = 35,7, \quad t_3 = 2,85. \quad (3.51)$$

Беручи до уваги, що відношення (3.51) вище граничної величини критерію Стюдента $t_{0,1}(4) = 2,132$ [3] ($t_j > t_{0,1}(4) = 2,132$), знайдені коефіцієнти рівняння регресії (3.45) є значимими. Тому рівняння регресії (3.45) запишеться у вигляді

$$\hat{x} = 1,103 - 0,065X_1 + 0,39X_2 + 0,036X_2^2. \quad (3.52)$$

Для перевірки адекватності рівняння регресії (3.52), отриманого методом ЦКРП, обчислимо суму квадратів, пов'язану з дисперсією, що характеризує помилку досліду, проведеного в центрі плану

$$S_0 = \sum_{i=1}^{n_0} (x_{0i} - \bar{x}_0)^2. \quad (3.53)$$

Підставляючи у формулу (3.53) дані табл. 3.3, знаходимо

$$S_0 = \sum_{i=1}^5 (x_{0i} - \bar{x}_0)^2 = 0,0046. \quad (3.54)$$

Тоді вибіркова дисперсія досліду в центрі плану знаходиться по формулі

$$s_0^2 = \frac{S_0}{n_0 - 1},$$

або, з урахуванням (3.54),

$$s_0^2 = \frac{0,0046}{4} = 0,00115. \quad (3.55)$$

Залишкова сума квадратів обчислюється по формулі

$$S_{\text{ост}} = \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2,$$

або, з урахуванням даних табл. 3.3 і розрахунків по формулі (3.52), одержуємо

$$S_{\text{ост}} = \sum_{i=1}^{13} (x_i - \hat{x}_i)^2 = 0,01096. \quad (3.56)$$

Адекватність рівняння регресії визначається як різниця

$$S_{\text{ад}} = S_{\text{ост}} - S_0 = 0,01096 - 0,0046 = 0,006355. \quad (3.57)$$

Для знаходження дисперсії, що оцінює адекватність моделі, необхідно знайти число ступенів свободи, відповідній до суми (3.57),

$$k_{\text{ад}} = k_{\text{ост}} - k_0, \quad (3.58)$$

де $k_{\text{ост}} = N - \frac{(n+1)(n+2)}{2}$ – число ступенів вільності, відповідній до суми (3.56),

k_0 – число ступенів свободи, відповідній до суми (3.54).

Для нашого випадку

$$k_{\text{ост}} = N - \frac{(n+1)(n+2)}{2} = 13 - \frac{(2+1)(2+2)}{2} = 7, \quad k_0 = n_0 - 1 = 5 - 1 = 4,$$

$$k_{\text{ад}} = k_{\text{ост}} - k_0 = 7 - 4 = 3.$$

Тоді вибіркова дисперсія, що оцінює адекватність моделі, знаходиться по формулі

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{S_{\text{ад}}}{k_{\text{ад}}}, \quad (3.59)$$

або

$$s_{\text{ад}}^2 = \frac{S_{\text{ад}}}{k_{\text{ад}}} = \frac{0,00635}{3} = 0,002118.$$

Розрахункове значення критерію Фішера знаходиться як відношення

$$F = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_0^2}, \quad (3.60)$$

або

$$F = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_0^2} = \frac{0,002118}{0,00115} = 1,84.$$

Табульоване значення критерію Фішера при рівні значимості $\alpha = 0,05$ й числі ступенів вільності $k_1 = k_{\text{ад}} = 3$ й $k_2 = k_0 = 4$ дорівнює $F_{0,05}(3;4) = 6,59$ [129].

Тому що $F = 1,84 < F_{0,05}(3;4) = 6,59$, то отримане рівняння (5.40) адекватно експерименту.

На наступному кроці для цілей оптимізації необхідно провести канонічний аналіз синтезованої математичної моделі [137]. Для цього математична модель представляється в типовій канонічній формі. Канонічна форма рівняння регресії другого порядку дозволяє одержати наочну геометричну інтерпретацію функції відгуку в області оптимуму, що дозволить зручно представити результати для подальших досліджень. Беручи до уваги, що розглядаються тільки два фактори (I та V), розглядаються контурні криві на площині, що є ізолініями. По розташуванню ізоліній можна судити про форму функції відгуку. У задачі, що розглядається, згідно з рівнянням регресії (3.52), ізолінії задаються рівняннями

$$0,036X_2^2 - 0,065X_1 + 0,39X_2 = C_k - 1,103, \quad (k = 1; 2; \dots) \quad (3.61)$$

де C_k – параметр, який визначає розташування ізоліній.

Беручи до уваги, що в рівняння (3.61) тільки один фактор входить у другій ступені, можна зробити висновок, що ізолінія є параболою. Приведемо криву (3.61) до канонічного виду. Для знаходження координат вершини параболі виділяємо повний квадрат

$$0,036 \left(X_2^2 + 2 \frac{0,39}{0,072} X_2 + \left(\frac{0,39}{0,072} \right)^2 \right) - 1,056 - 0,065 X_1 = C_k - 1,103,$$

$$0,036 \cdot (X_2 + 5,417)^2 - 0,065 X_1 = C_k - 0,047,$$

$$(X_2 + 5,417)^2 = 1,806(X_1 + 15,385 \cdot C_k - 0,723). \quad (3.62)$$

Таким чином, вершина параболі перебуває в точці

$$M_0(0,723 - 15,385 \cdot C_k; -5,417). \quad (3.63)$$

На рис. 3.7 представлені ізолінії для різних значень параметра C_k .

Аналіз ізоліній, наведених на рис. 3.7, показує, що ці ізолінії є параболою. При збільшенні параметра x (рівного C_k) відбувається зсув вершини параболі вліво уздовж осі X_1 . Необхідно підкреслити, що через область, у якій будувалась математична модель, проходить тільки верхня гілка параболі.

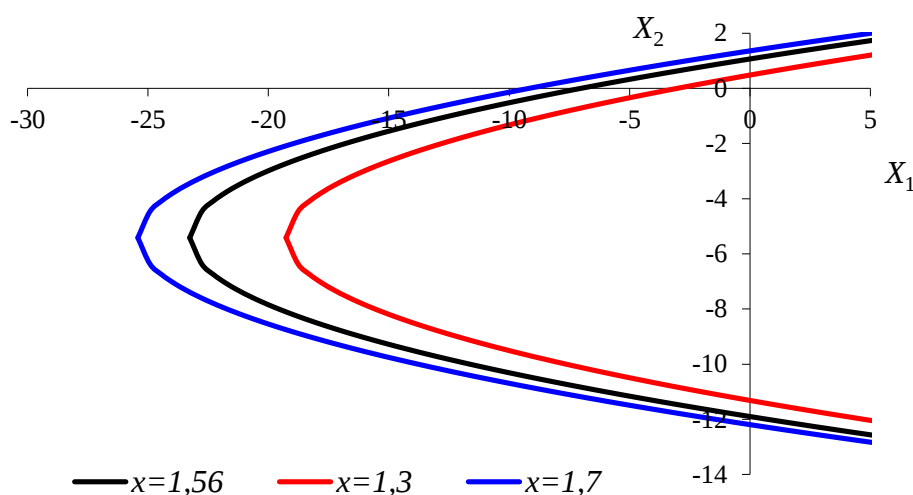


Рис. 3.7. Ізолінії поверхні відгуку, визначені рівнянням (3.52)

На рис. 3.8 представлено частину області, через яку проходить верхня гілка параболі, відповідна до оптимальної величини змінної x ($x_{opt} = 1,56$).

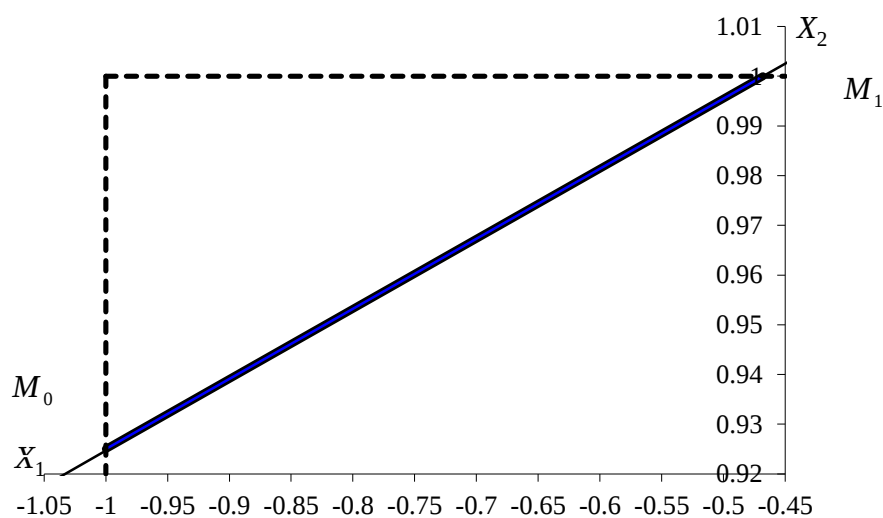


Рис. 3.8. Ділянка оптимальної ізолінії, що проходить через область моделювання поверхні відгуку

Враховуючи, що область моделювання поверхні відгуку визначається нерівностями $[-1 \leq X_1 \leq 1; -1 \leq X_2 \leq 1]$, на рис. 3.8 виділена тільки та частина оптимальної ізолінії, яка проходить через цю область. Границі цієї області знаходяться як результат перетинання оптимальної ізолінії із прямими, що обмежують область моделювання, тобто шляхом розв'язку систем рівнянь

$$\begin{cases} X_1 = -1 \\ (X_2 + 5,417)^2 = 1,806(X_1 + 23,269) \end{cases}, \quad \begin{cases} X_2 = 1 \\ (X_2 + 5,417)^2 = 1,806(X_1 + 23,269) \end{cases}.$$

Підставляючи в друге рівняння значення невідомих з першого рівняння, послідовно одержуємо

$$\begin{aligned} \begin{cases} X_1 = -1 \\ (X_2 + 5,417)^2 = 1,806(-1 + 23,269) \end{cases} & \quad \begin{cases} X_2 = 1 \\ (1 + 5,417)^2 = 1,806(X_1 + 23,269) \end{cases} \\ \begin{cases} X_1 = -1 \\ (X_2 + 5,417)^2 = 1,806 \cdot 22,269 \end{cases} & \quad \begin{cases} X_2 = 1 \\ 6,417^2 = 1,806(X_1 + 23,269) \end{cases} \\ \begin{cases} X_1 = -1 \\ (X_2 + 5,417)^2 = 40,218 \end{cases} & \quad \begin{cases} X_2 = 1 \\ 41,178 = 1,806(X_1 + 23,269) \end{cases} \\ \begin{cases} X_1 = -1 \\ X_2 + 5,417 = 6,342 \end{cases} & \quad \begin{cases} X_2 = 1 \\ 41,178 = 1,806 \cdot X_1 + 42,024 \end{cases} \\ \begin{cases} X_1 = -1 \\ X_2 = 0,925 \end{cases} & \quad \begin{cases} X_1 = 0,468 \\ X_2 = 1 \end{cases} \end{aligned}$$

Таким чином, точки перетинання оптимальної ізолінії із прямими, що обмежують область, задаються точками $M_0(-1;0,925)$ й $M_1(0,468;1)$.

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. Більше того, аналіз форми графіка на рис. 3.8, указує на можливість представлення його у вигляді відрізка прямої. Тому безліч розв'язків може бути записано у вигляді лінійної комбінації координат кінців цього відрізка прямої, тобто

$$\begin{cases} X_1 = -1 + 1,468 \cdot t \\ X_2 = 0,925 + 0,075 \cdot t \end{cases}, \quad (0 \leq t \leq 1). \quad (3.64)$$

Для переходу з (3.64) до дійсних величин необхідно скористатися формулами переходу

$$X_1 = \frac{V - 400}{50}, \quad X_2 = \frac{I - 200}{50}. \quad (3.65)$$

Підставляючи формули (3.65) в (3.64), знаходимо оптимальні розв'язки в дійсних одиницях

$$\begin{cases} V = 350 + 73,4 \cdot t \\ I = 246,25 + 3,75 \cdot t \end{cases}, \quad (0 \leq t \leq 1). \quad (3.66)$$

Разом з тим, можна поставити питання про вибір такого оптимального розв'язку, який був би єдиним. Для цього необхідно ввести критерій, що дозволяє вибрати з безлічі оптимальних розв'язків, що задаються формулою (3.66), єдиний розв'язок. Представляється доцільним задати економічний критерій, що дозволяє порівнювати витрати при реалізації процесу ППДЗ, пов'язані з величинами швидкості переміщення джерела нагрівання й силою струму плазмової дуги. Якщо прийняти, що в розглянутих межах зміни факторів економічний критерій залежить лінійно від змінних факторів, то його можна записати у вигляді

$$L = c_1 \cdot V + c_2 \cdot I, \quad (3.67)$$

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

Оптимальне завдання формулюється як знаходження мінімуму функціонала (3.67) при виконанні умови (3.66)

$$L = c_1 \cdot V + c_2 \cdot I \rightarrow \min_{V,I}, \quad (3.68)$$

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

Беручи до уваги структуру розв'язку (3.66) і лінійність функціонала (3.67), можна зробити висновок, що оптимальність розв'язку (3.68) буде досягатися на кінцях відрізка, обумовленого значеннями параметра t ($t = 0$ або $t = 1$). Причому вибір одного або іншого значення буде визначатися співвідношенням між питомими витратами c_1 і c_2 . Тому для зручності одержання розв'язку природно ввести безрозмірний функціонал, розділивши, наприклад, обидві частини (3.67) на c_2

$$\hat{L} = \hat{c}_1 \cdot V + I, \quad (3.69)$$

$$\text{де } \hat{L} = \frac{L}{c_2}, \quad \hat{c}_1 = \frac{c_1}{c_2}.$$

Тоді оптимальне завдання (3.68) запишеться як мінімізація (3.69), тобто

$$\hat{L} = \hat{c}_1 \cdot V + I \rightarrow \min_{V,I}, \quad (3.70)$$

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

Послідовно підставляючи граничні значення факторів, знаходимо

$$t = 0, \begin{cases} V_0 = 350 \\ I_0 = 246,25 \end{cases}, \quad \hat{L}_0 = \hat{c}_1 \cdot 350 + 246,25, \quad t = 1, \begin{cases} V_1 = 423,4 \\ I_1 = 250 \end{cases}, \quad \hat{L}_1 = \hat{c}_1 \cdot 423,4 + 250. \quad (3.71)$$

На рис. 3.9 представлені графіки залежності витрат (3.69) при граничних значеннях факторів.

Аналіз графіків, наведених на рис. 3.9, показує, що мінімальні економічні витрати мають місце при $t = 0$, тобто на лівому кінці оптимальної ізолінії (3.66).

Таким чином, оптимальними значеннями факторів при проведенні процесу ППДЗ є

$$V_{\text{opt}} = 350 \text{ мм/хв}, \quad I_{\text{opt}} = 245 \text{ А}. \quad (3.72)$$

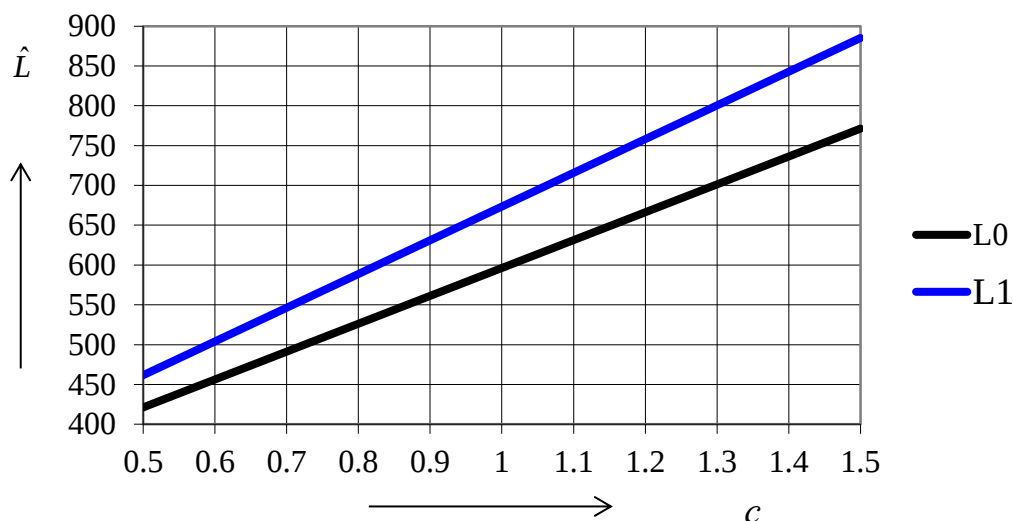


Рис. 3.9. Залежність мінімальних економічних втрат $\hat{L}$ від відношення питомих вартостей c

Отримані значення факторів (3.72) визначають оптимальні величини швидкості переміщення джерела нагрівання й струму плазмової дуги, які забезпечують оптимальний термін експлуатації зубчастих коліс, підданих ППДЗ.

Висновки до розділу 3

Проведений аналіз дозволяє зробити наступні висновки:

1. При зміцненні конструкційних легованих сталей (40Х, 45Г), з яких виготовляються зубчасті передачі, впливом джерел КДЕ, головними параметрами визначальними результат обробки, є ефективна питома потужність q і час дії τ джерела, причому досягненню температури плавлення на оброблюваній поверхні відповідає цілком певна комбінація q і τ , що залежить від теплофізичних констант матеріалу, а цій комбінації - фіксований розподіл температурних полів у матеріалі.

2. Для кожного матеріалу існують граничні значення питомої потужності, вище яких він змінює свій агрегатний стан. Наведені граничні значення питомого теплового потоку є фундаментальними тепловими характеристиками

матеріалу, тому що визначають його здатність поглинати певний рівень його енергії в одиницю часу й змінювати його агрегатний стан. У цьому істотну відмінність даних характеристик від запропонованих критичних густин потоку випромінювання, які по суті являють собою окремі випадки комбінації часу τ дії джерела й щільності теплового потоку для досягнення на поверхні матеріалу температури фазового переходу.

3. При термічній обробці сталі без оплавлення ($T \leq T_{II}$) кожному рівню питомої потужності теплового джерела з $q_2 > 7,8 \cdot 10^7$ Вт/м² відповідає певна максимальна глибина загартованого шару, яка залежить тільки від теплофізичних констант сталі і її вихідного структурного стану.

4. У порівнянні з іншими джерелами КДЕ скануюча плазмова дуга має ряд додаткових переваг: простота й відносно низька вартість устаткування для реалізації; високий ефективний ККД нагрівання (до 40%); можливість використання повної електричної потужності дуги для підвищення продуктивності нагрівання.

5. Установлено, що в міру зношування зуба, небезпечний переріз переміщається від ніжки зуба до його головки. При зношуванні до 20% вигинна міцність зуба суттєво не знижується, при зношуванні більш 20% запропоновані залежності, що враховують її зниження. 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 плазмового зміцнення.

6. Аналітичні дослідження зміни геометрії й кінематики зачеплення в процесі зношування зустрічають значні труднощі. Тому все ще важливе значення мають експериментальні методи, які особливо ефективні при вивченні вузького класу зубчастих передач, до яких відносяться відкриті пари рудорозмельних млинів. При цьому, як найбільш точним, перевагу необхідно віддати дослідженням, що встановлюють безпосередній зв'язок між величиною зношування й швидкістю зношування.

7. Аналіз особливостей експлуатації відкритих зубчастих передач дозволив зробити висновок про доцільність використання економічних показників для визначення оптимального терміну їх служби.

8. Мінімізація економічного критерію, пов'язаного з питомими витратами на технічне обслуговування й ремонт із урахуванням вартості виготовлення зубчастих коліс при використанні ППДЗ, дало можливість оцінити оптимальний час експлуатації відкритих зубчастих передач.

9. З метою дослідження впливу на процес ППДЗ зубчастих коліс швидкості руху джерела нагрівання й сили струму плазмової дуги був організований активний експеримент шляхом використання послідовного симплекс-методу, який дав можливість виділити область оптимуму поверхні відгуку.

10. Для вивчення області оптимуму поверхні відгуку була використана нелінійна стохастична модель, описувана поліномом другого порядку. Застосування композиційного рототабельного планування експерименту дало можливість синтезувати математичну модель. Наступний статистичний аналіз результатів моделювання дозволив на основі критерію Стюдента відсіяти незначущі коефіцієнти математичної моделі, а також установити її адекватність шляхом застосування критерію Фішера.

11. Детальне дослідження знайденої області оптимуму шляхом побудови ізоліній указало на наявність безлічі розв'язків, розташованих на оптимальній ізолінії. 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 межах оптимальної ізолінії дала можливість визначити величини швидкості руху джерела нагрівання й сили струму плазмової дуги для забезпечення оптимального терміну експлуатації зубчастого колеса, поверхня якого піддана ППДЗ.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕЛИКО-MОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ ШЛЯХОМ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОВО- ДУГОВОГО ЗМІЩЕННЯ

4.1. Дослідження процесу зношування відкритих зубчастих передач

4.1.1. Вимір зношування зубів і аналіз отриманих результатів. Вимір величин зношування зубів відкритих передач стрижневих, шарових млинів проводилися на Інгулецькому, Новокриворізькому, Центральному й Північному гірничозбагачувальних комбінатах.

На рис. 4.1, 4.2 представлені типові криві зношування зубів, побудовані за результатами даних досліджень, де видні припрацювальний й встановлений періоди зношування. При величині зношування більш 3÷4 мм відбувається різке збільшення швидкості зношування (катастрофічне зношування).

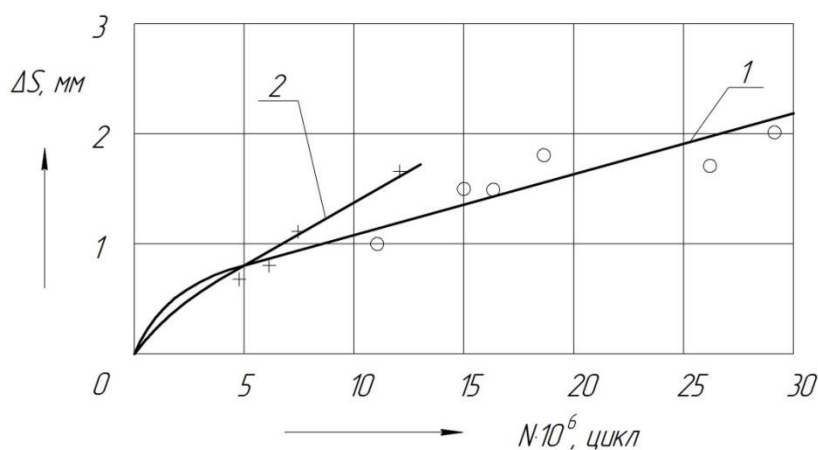


Рис. 4.1. Крива зношування зубів шестірні (1) і вінця (2) млина
МШР-4000х5000

Для того щоб по величині усередненого зношування приблизно судити про профіль зношеного зуба, при обробці результатів вимірів визначилося відношення величин зношування зубів у даній точці до середнього. Отримані наступні усереднені співвідношення: на діаметрах ділильної окружності

$\Delta S \approx 0,91\Delta S_{\text{ср}}$, на відстанях 0,25m і 1,75m, $\Delta S = 1,25\Delta S_{\text{ср}}$ і $\Delta S = 1,0\Delta S_{\text{ср}}$.

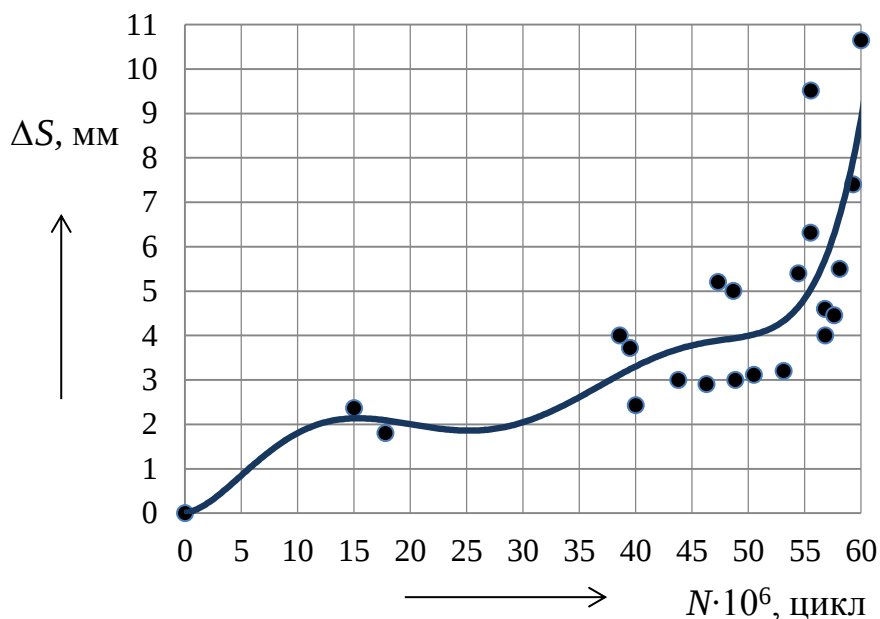


Рис.4.2. Крива зношування зубів шестірні млина ММС-9000х3000

По ширині зубів зношування також не однакове. Останнє пояснюється нерівномірністю розподілу навантаження уздовж контактних ліній. На рис. 4.3-4.4 наведені епюри зношування млина МБ-7000х2300 і МШЦ-45000х6000 по їх ширині. Рисунок 4.3-4.4 демонструють можливість значних перекосів зубів шестірні й колеса при експлуатації млинів.

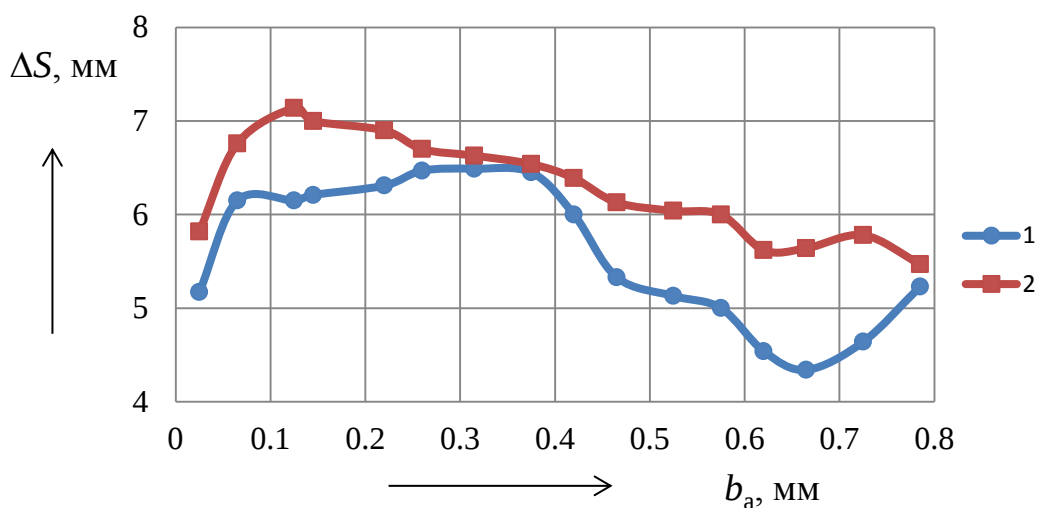


Рис. 4.3. Залежність величини зношування ΔS профілю зубів ($m=20$) млинів МШЦ-4500х6000 по ширині b_a : 1 – величина зношування на відстані від вершини зуба 5 мм; 2 – на відстані від вершини зуба 20 мм

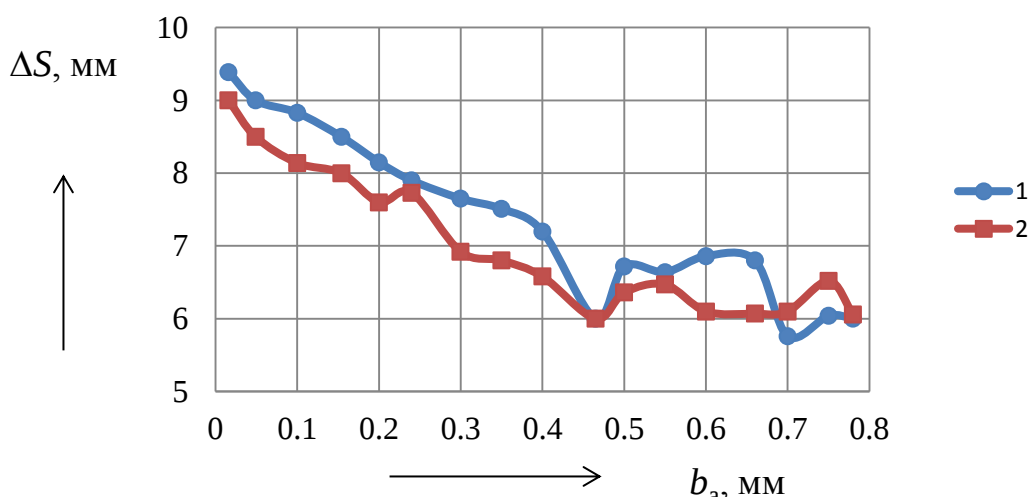


Рис. 4.4 Залежність величини зношування ΔS профілю зубів ($m = 20$) млинів МБ-7000х2300 по ширині b_a : 1, 2 величини зношування на відстані від вершини зуба 5 і 20 мм

4.1.2. Дослідження закономірностей абразивного зношуванні відкритих зубчастих передач рудорозмельних млинів. Зношування зубів можна розбити на три періоди: припрацювальний, встановлений й катастрофічний. Розглядаючи величину зношування зубів у часі, у межах кожного з періодів дійсну залежність замінюють лінійною (рис. 4.5). Інтенсивність зношування й величина зношування в припрацювальному періоді у відкритих зубчастих передачах рудорозмельних млинів у значній мірі визначається взаємними перекосами зубів, що приводять до значних концентрацій навантаження по ширині зубчастого вінця і є випадковою величиною.

У результаті обробки експериментальних даних встановлено, що величини припрацювального зношення зубів шестірні й вінця в основному лежать у межах $\Delta S_{10} = 0,6 \div 1,5$ мм, $\Delta S_{10} = 0,3 \div 0,6$ мм. Швидкість припрацювального зношування шестірні в середньому рівна $Vn_1 \approx 5V_1$ (V_1 — швидкість у період встановленого зношування шестірні), а його тривалість $t_0 \approx \Delta S_{10} / 5V_1$.

За термін служби шестірні найбільш тривалим є період зношування, що встановився. На рис. 4.6 представлені усереднені величини зношування зубів шестірні від числа циклів зачеплень у цей період.

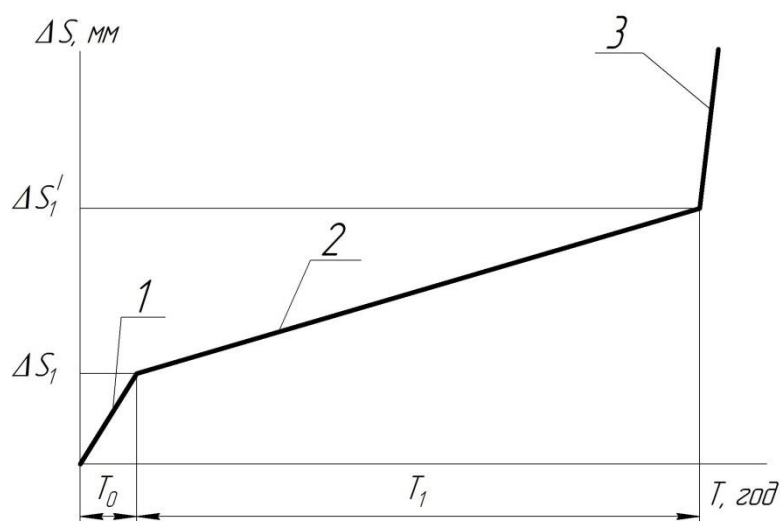


Рис. 4.5. Ідеалізована крива зношування зубів шестірни

ΔS_1 , T_1 – величина й тривалість припрацювального зношування;
 $\Delta S'_1$ – величина зношування зубів однієї активною поверхнею, що допускається; T_1 – тривалість періоду зношування, що встановився

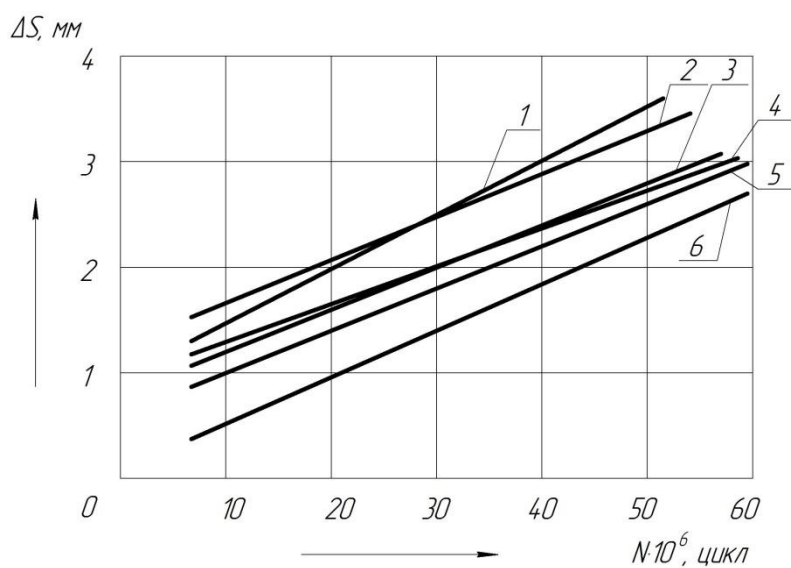


Рис. 4.6. Експериментальні залежності величини зношування зубів шестірень у режимі, що встановився

1 – ММЦ-3600х5500; 2 – ММС-9000х3000; 3 – МШР-4000х5000
 4 – МШР-3600х4000; 5 – МБ-7000х2300; 6 – CSR-3600х4000

Починаючи з величини зношування зубів шестірни $\Delta S'_1 = 3 \div 4$ мм починається катастрофічний період зношування. Швидкість зношування в цей період приблизно рівна $V_{x1} \approx 25V_1$.

У зв'язку з цим допустиму величину зношування зубів шестірні доцільно призначати $[\Delta S_1] \leq 8$ мм (по 4 мм із кожної активної поверхні зуба).

Досвід експлуатації й експериментальні дослідження показують, що довговічність зубчастого вінця визначається не фізичними можливостями, а економічними факторами. При певній величині зношування вінця довговічність шестірень настільки знижується, що подальша експлуатація його недоцільна. На рис. 4.7 представлена експериментальна залежність швидкості зношування шестірень млинів МБ-7000х2300 в умовах Інгулецького ГЗК від усередненої величини зношування зубів вінця.

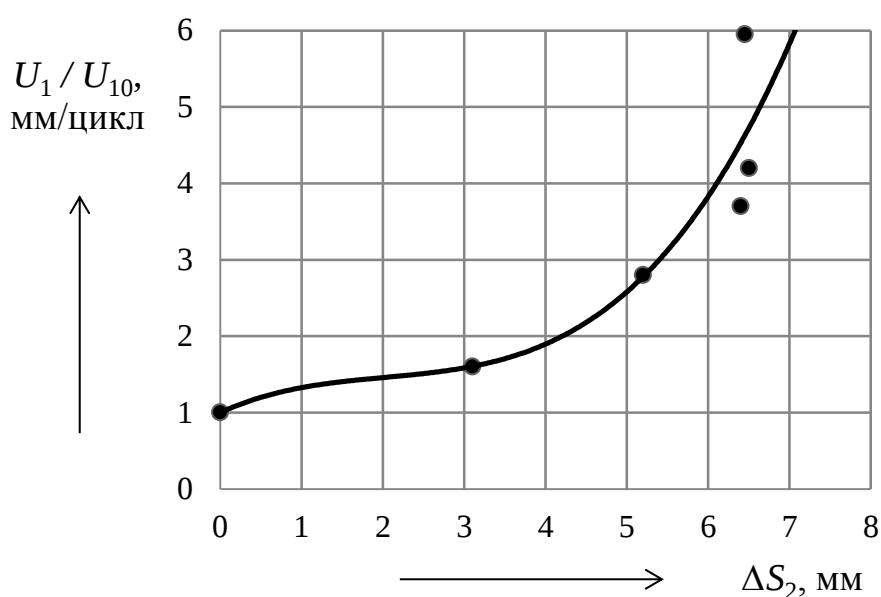


Рис. 4.7. Залежність швидкості зношування зубів шестірні млина МБ-7000х2300 від величини зношування зубів вінця,

U_{10} – швидкість зношування в початковий момент (при $\Delta S_2 \approx 0$)

Так, у початковий період експлуатації млинів МБ-7000х2300 довговічність приводної шестірні становила 3-3,5 року. Після зношування зубів вінця на величину $\Delta S_2 = 6,6$ мм, термін служби шестірні скоротився до 6-8 місяців.

Припускаючи, що такої ж закономірності підкоряється швидкість зношування вінця, експериментальну залежність апроксимуємо степеневою функцією [139].

$$U_{1(2)} = U_{1(2)0} [1 + (K\Delta S_2)^x] \quad (4.1)$$

У цьому випадку коефіцієнти $K=0,237 \text{ мм}^{-1}$, $x=2,8$, де $U_{1(2)0}$ – швидкість зношування зубів шестірні й вінця в початковий період.

При проектуванні й експлуатації млинів, виборі того або іншого варіанта привода необхідно визначати довговічність зубчастих передач, оцінювати ефективність заходів, спрямованих на її збільшення.

Для важконавантажених елементів пар тертя, до яких відносяться зубчасті зачеплення відкритих передач млинів швидкість зношування залежно від умов абразивного впливу A , фізико-механічних властивостей матеріалів $M_{1(2)}$, геометричних і кінематичних параметрів сполучень K можна представити у вигляді (3.18).

Дослідження умов експлуатації, фізико-механічних властивостей матеріалів, застосовуваних для виготовлення зубів, дають підставу вважати, що усереднені параметри A і $M_{1(2)}$ у виразі (4.1) близькі для всіх досліджуваних передач. У зв'язку із цим, можна припустити, що у випадку придатності залежності (4.1) для аналізу й оцінки зношування відкритих зубчастих передач рудорозмельних млинів відношення експериментальних величин $U_{1(2)}$ до розрахункових величин K при всіх інших незмінних умовах повинні незначно відрізнятися.

У таблиці 4.1, поряд з експериментальними значеннями U_1 , представлені розрахункові величини K , на підставі яких отриманий параметр $N_1 = 6.8 \cdot 10^{-3} \text{ А/М}$, що характеризує абразивний вплив середовища та фізико-механічних властивостей матеріалів зубів для умов роботи відкритих пар рудорозмельних млинів в даний час на ГЗК.

Обробка даних показує, що аналітичні вирази якісно правильно описують абразивне зношування зубів відкритих передач млинів. Крім того, для передач, що перебувають у близьких умовах задовільним є й кількісний збіг результатів.

Враховуючи (3.5) і результати експериментальних досліджень аналіз і оцінку швидкості зношування відкритих зубчастих передач рудорозмельних млинів будемо робити по наступній формулі [140]:

$$U_{1(2)} = 60 N_{1(2)} K n_{1(2)} c_2 L_{1(2)} \quad (4.2)$$

де $N_{1(2)}$ – параметр, що характеризує абразивний вплив середовища й фізико-механічні властивості матеріалів зубів для даних умов експерименту (косозуба передача не захищена від потрапляння механічних домішок, матеріал зубчастих коліс – конструкційна сталь (табл. 4.1), зуби шестірні із твердістю $HB_1=260-300$, твердість зубів вінця $HB_2=180-200$; для млинів, що працюють приблизно в рівних умовах, усереднені величини $N_1=3,4 \cdot 10^{-10} \text{ мм}^{1/2}$, $N_2=6,4 \cdot 10^{-10} \text{ мм}^{1/2}$),

$n_{1(2)}$ – 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:

$$L = \frac{\xi}{K_{q_a}^{2/3} K_R^{0,5} K_\sigma^{1,5} \mu_{\delta_{1(2)}}^2 \mu_{HB_{1(2)}}^{1,5} \mu_{HB_{(2)1}}} \quad (4.3)$$

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

(величини з індексами N відповідають тим, для яких визначений параметр $N_{1(2)}$, а з індексом P – розрахунковому випадку).

У виразі (4.3) передбачається, що при зниженні або підвищенні навантаження в зачепленні можливий помітний прояв супутніх видів зношування, вплив яких будемо враховувати коефіцієнтом ξ . Зубчасті передачі, досліджуваних млинів зазнають приблизно рівні навантаження, що дозволяє прийняти $\xi=1$.

Особливістю роботи відкритих зубчастих передач млинів є те, що за термін служби вона може випробовувати ряд припрацювальних режимів, у період яких має місце прискорене зношування. Багаторазовість припрацювальних режимів вінця зв'язане насамперед з тим, що в парі з ним працює кілька шестірень, тому що їх термін служби значно менший. У ряді

випадків, ремонт барабана здійснюють на спеціальному стенді. Барабан разом із приробленим вінцем переносять на стенд, а на його місце встановлюють барабан, вінець якого до цього працював у парі з іншою шестірнею. Із цієї причини, в умовах, наприклад Інгулецького ГЗК, зуби вінця й шестірні млина МБ-7000х2300 випробовують припрацювальні режими через кожні 5-6 місяців.

Таблиця 4.1

Результати обробки експериментальних даних

Тип млина	Місце роботи	Зношування зубів шестірні за одне навантаження $U_1 \cdot 10^{-8}$, мм/цикл	Параметр, що характеризує геометрію й кінематику сполучень K , мм	Параметр, що характеризує абразивний вплив середовища й фізико-механічні властивості матеріалів, $N_1 \cdot 10^{-3}$, мм
МШЦ-3600х3500	Інгулецький ГЗК	0,050	153,1	3,20
МШЦ-4500х6000	Інгулецький ГЗК	0,047	138,6	3,4
МШЦ-3600х4000	Новокриворізький ГЗК	0,047	138,6	3,4
ММС-9000х3000	Північний ГЗК	0,043	119,6	3,6
МБ-7000х2300	Центральний ГЗК	0,033	88,2	3,7
ММС-7000х2300	Інгулецький ГЗК	0,030	88,2	3,4

Нехай за термін служби шестірні зубчасте зачеплення випробовує r_i припрацювальних режимів. Усереднюючи швидкість зношування, довговічність шестірні визначимо з виразу

$$r_i \Delta S_{10} + U_{1cp} t_i \leq [\Delta S_1], \quad (4.4)$$

де $i=1,2,3,\dots,n$; (кількість шестірень, що працювали з вінцем за термін служби);

t_i – сумарний час зношування зубів у режимі, що встановився, за термін служби шестірні;

$[\Delta S_1]$ – величина зношування, що допускається.

Враховуючи, що довговічність шестірні рівна $T_{1i} = t_i + r_i t_{0i}$, з (4.4) одержимо:

$$T_{1i} = \frac{[\Delta S_1] - r_i \Delta S_{10}}{U_{1cp}} + r_i t_{0i} \quad (4.5)$$

Величину зношування зубів вінця можна представити як суму зношувань, які вони перетерплюють при роботі з кожною шестірнею.

$$\Delta S_2 = \sum_{i=1}^n (v_2 r_i \Delta S_{20} + U_{2icp} t_i) \quad (4.6)$$

Тоді, довговічність вінця буде

$$T_2 = \sum_{i=1}^n T_{1i} \quad (4.7)$$

Переходячи до практичних розрахунків бачимо, що у термін служби i -ї шестірні зуби вінця зносяться на величину

$$\Delta S_{2i} = V_2 r_i \Delta S_{20} + U_{2icp} t_i \quad (4.8)$$

Підставляючи в (4.8) t_i з (4.5), одержимо

$$\Delta S_{2i} = v_2 r_i \Delta S_{20} + \frac{U_{2icp}}{U_{1icp}} \{ [\Delta S_1] - r_i \Delta S_{10} \} \quad (4.9)$$

$$\frac{U_{2icp}}{U_{1icp}} = \frac{U_{20}}{U_{10}} = const \quad (4.10)$$

Вираз (4.7) і співвідношення (4.8) показують, що, незважаючи на різну швидкість зношування й довговічність шестірень, величина зношування зубів вінця за термін служби кожної шестірні буде постійною ($\Delta S_{2i} = const$) і, при всіх інших незмінних параметрах, буде визначатися відношенням U_{20}/U_{10} . У виразах 4.4 і 4.6:

$$U_{1(2)icp} = U_{1(2)0} \left\{ 1 + \frac{K}{x+1} \Delta S_{2i}^x [i^{x+1} - (i-1)^{x+1}] \right\} \quad (4.11)$$

Вирази (4.9) і (4.11) дозволяють у початковій стадії розрахунків визначати ΔS_{2i} і $U_{1(2)icp}$.

При заданій кількості припрацювальних режимів за термін служби (якщо шестірня один раз переустановлюється для роботи зубів іншою стороною, $r_i=2$) розрахунки довговічності не представляє ускладнень. Довговічність шестірні

визначена правильно, якщо виконується умова $\frac{T_{1i}}{r_i \tau} \leq 1$

Згідно (3.18) на швидкість абразивного зношування впливає величина, що характеризує фізико-механічні властивості матеріалу зубчастих коліс $M = \delta^t HB_{1(2)}^{1,5} HB_{2(1)}$. Величина σ – складена величина параметра, що характеризує абразивний вплив середовища. Проте, σ , крім того є функцією твердості активних поверхонь зубів. Тому, розглядаючи вплив фізико-механічних властивостей матеріалів будемо враховувати, що швидкість зношування залежить від наступних величин

$$U_{1(2)} \approx \frac{\sigma^{2,5}}{\delta^t HB_{1(2)}^{1,5} HB_{2(1)}} \quad (4.12)$$

Підвищення твердості активних поверхонь зубів приводить до зниження σ . Аналізуючи вираз (4.12) помітимо, що підвищення твердості активної поверхні навіть одного із зубчастих коліс приводить до зниження межі міцності абразивних часток [89] отже, швидкості зношування.

Підвищення твердості активних поверхонь зубів відкритих зубчастих передач, крім того, сприяє зниженню супутніх видів зношування, підвищенню їх контактної міцності.

Таким чином, у результаті обробки й аналізу експериментальних даних отримані усереднені величини, що характеризують різні етапи зношування. Зіставленням експериментальних швидкостей зношування з розрахунковими величинами, що характеризують геометрію й кінематику зачеплення, виділений параметр, що враховував абразивний вплив середовища й фізико-механічні властивості матеріалів зубів для даних умов експерименту. Останнє дозволило обґрунтувати застосування існуючих закономірностей абразивного зношування для інженерних розрахунків руйнування відкритих зубчастих передач рудорозмельних млинів.

Отримані результати досліджень швидкості й величини зношування контактних поверхонь зубів слід зіставити з результатами розрахунків теплових полів від СПД із метою встановлення можливості здійснення структурних перетворень матеріалу зубчастих коліс на задану глибину.

4.2. Аналітичний розрахунок температурного поля заготовки, яке виникає від дії плазмової дуги, що сканує

Як було відзначено вище, скануюча плазмова дуга (СПД) є перспективним джерелом регламентованого нагрівання металів і сплавів. Незважаючи на те, що плазмова дуга як теплове джерело й можливість керування нею за допомогою електромагнітного поля були відомі давно, питання нагрівання СПД залишається маловивченим. Зокрема відсутні аналітичні залежності, що зв'язують основні параметри обробки: питому теплову потужність і час її впливу на оброблюваний матеріал з формуванням температурних полів у ньому, ККД джерела нагрівання, без чого не можливо прогнозувати протікання структурно-фазових перетворень, як при нагріванні, так і при охолодженні.

Подальше вдосконалювання процесу плазмового нагрівання при зміцненні деталей викликає необхідність вивчення теплових явищ, що виникають при впливі плазмової дуги на оброблюваний матеріал. Застосування матеріалів з різними механічними й теплофізичними властивостями, вимога інтенсифікації процесу їх обробки приводять до того, що температура процесу стає одним з факторів, що визначають продуктивність зміцнення, глибину загартованого шару й, як наслідок, збільшення ресурсу зубчастого зачеплення. У зв'язку із цим виникає необхідність керування тепловими явищами при ППДЗ. Таке керування необхідне в тому розумінні, що плазмова дуга, як джерело нагрівання, має високу інтенсивність впливу на матеріал і, беручи до уваги збереження якості обробленої поверхні, слід досить точно задавати співвідношення параметрів нагрівання. Тепловий вплив не на всю заготовку, а на її поверхневий шар дає не тільки великий економічний ефект, але й поліпшує багато фізичних параметрів процесу [115].

Тому необхідно зробити математичний опис процесу нагрівання й наступного охолодження, щоб надалі мати можливість аналітичним шляхом

визначати температуру підігріву припуску, що цікавить й потім оптимізувати параметри нагрівання відповідно до мети плазмового зміцнення.

Математичний опис не може повністю відобразити всю сукупність сторін процесу ППДЗ. Але для дослідження основних його закономірностей, особливо з метою розв'язку практичних завдань, можна не враховувати деякі сторони явищ, що відбуваються, тому що практика розрахунків показує, що погрішності розв'язку, викликані ускладненням математичного апарата, можуть іноді звести нанівець уточнення, досягнуті деталізацією процесу [99]. Тому першим етапом у математичному описі теплових явищ при ППДЗ є схематизація самого процесу, властивостей і форми джерела й об'єкта нагрівання.

При виборі розрахункової схеми слід заздалегідь визначитися, яким з методів буде проводитися аналітичні розрахунки температурного поля. Основна проблема в дослідженні явищ при впливі теплових джерел високої інтенсивності, до яких відноситься плазмова дуга, полягає в тому, що механізми досліджуваних явищ базуються на сильному взаємному впливі фізичних полів у зоні дії джерела на матеріал, причому з різними просторово-тимчасовими масштабами [116]. Традиційний підхід до розв'язку цього завдання полягає у введенні поняття ефективного теплового джерела [99], запропонованого академіком М.М. Рикаліним і розвиненого згодом професором А.Н. Рєзниковим [117].

Метод ефективних теплових джерел слушний при досить малій щільності фізичного джерела нагрівання, коли зміна температурного поля матеріалу відбувається набагато повільніше всіх інших полів. У цьому випадку всі швидкоплинні процеси встигають підлаштовуватися під більш інерційні теплові.

Висновки, викладені в роботах [99, 116-118], послужили в якості вихідних положень для розрахунків, запропонованих у цій роботі.

Для математичного опису теплових явищ, що відбуваються в тілі заготовки, його реальна форма була ідеалізована й, з урахуванням частого випадку граничних умов другого роду в технологічних завданнях теплофізики,

представлена у вигляді адіабатичного півпростору. Це допущення слушне, тому що результати дослідів і наявні літературні дані по поверхневому зміцненню дозволяють зневажити тепловим потоком через поверхню заготовки [118].

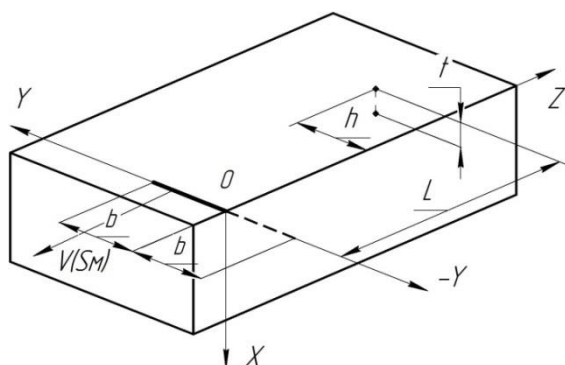


Рис. 4.8. Розрахункова схема для лінійного джерела нагрівання

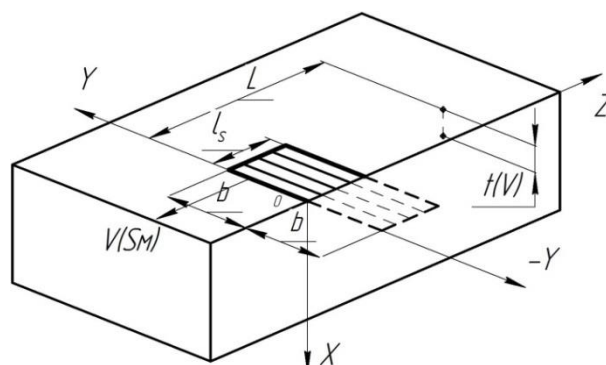


Рис. 4.9. Розрахункова схема для плоского джерела нагрівання

Дослідження процесу ППДЗ в даній роботі проводилося при порівнянні двох схем нагрівання. Відповідно до цього було прийнято дві розрахункові схеми. У першій з них джерело нагрівання представлене як одномірний, обмеженої ширини b інтенсивністю q (Вт/м²), швидкорухомий (рис. 4.8). На другій схемі джерело нагрівання представлене як плоский, з кінцевими розмірами по довжині й ширині (рис. 4.9), і теж швидкорухомий. Швидкорухомим прийнято називати джерела, для яких значення критерію Пекле ≥ 10 . Формули, що описують температурні поля, які виникають у матеріалі, що нагрівається, у результаті дії швидкорухомого джерела, суттєво спрощуються [118]:

$$Pe = \frac{V_d \times l_s}{\omega}, \quad (4.13)$$

де V_d – швидкість переміщення джерела нагрівання, мм/хв;

l_s – його розмір у напрямку руху, мм;

ω – коефіцієнт теплопроводності матеріалу, що нагрівається, м²/с.

При постійній швидкості руху швидкорухомого джерела процес нагрівання вважається встановленим, а саме температурне поле на деякому віддаленні від задньої границі джерела $Z = (1.5...2) l_s$ вже вважати

квазістаціонарним [119]. Це дозволяє одержати значення температури $\theta(x, y, z)$ по всьому обсягу зміцненого поверхневого шару, роблячи лише розрахунки в площині XOZ , але при різних значеннях Y (рис. 4.8).

У цьому випадку, як і в більшості технологічних процесів машинобудування, пов'язаних з теплопередачею, процес теплоперенасичення відбувається головним чином за рахунок теплопровідності металу [99, 117]. Тому математичний опис температурних полів для завдань, що цікавлять нас може бути представлено в самому загальному вигляді диференціальним рівнянням теплопровідності [99]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = w \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (4.14)$$

де t – час, хв;

θ – температура, °С;

x, y, z – координати точки теплопровідного тіла, мм.

Згідно з Кельвіном, процес поширення тепла від імпульсу точкового джерела описується виразом [99]:

$$\theta_{\text{точ}}(x, y, z, t) = \frac{q}{\lambda \sqrt{w(4\pi t)^{3/2}}} e^{-\frac{(x_u - x)^2 + (y_u - y)^2 + (z_u - z)^2}{4\omega t}} \quad (4.15)$$

де $\theta_{\text{точ}}(x, y, z, t)$ – температура будь-якої точки тіла з координатою (x, y) , що виникає через секунду після точкового теплового імпульсу;

e – основа натурального логарифма;

$\sqrt{(x_u - x)^2 + (y_u - y)^2 + (z_u - z)^2} = r$ – відстань від місця виникнення теплового імпульсу до розглянутої точки тіла.

Даний вираз задовольняє рівнянню (4.14) і крайовим умовам: при $t = 0$, $\theta = 0$, при $r = \infty$, $\theta = 0.93$. Користуючись головним розв'язком (4.15) можна одержати розв'язок диференціального рівняння (4.14) у різноманітних випадках.

Інтегруючи вираз (4.15) за часом, одержуємо повну температуру розглянутої точки під дією безупинно функціонуючого джерела тепла. Інтеграл

береться в загальному виді й виражається через модифіковану функцію Крампа інтеграла ймовірності Гаусса [99]:

$$\Phi(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-x^2} dx, \quad (4.16)$$

При $u = 0$, $\Phi(0) = 0$, для $u = \infty$, $\Phi(\infty) = 1$.

Для одномірного джерела обмеженої ширини температура точки тіла, що нагрівається, у період, коли джерело пройшло над нею, описується виразом [118]:

$$\begin{aligned} \theta(x, y, z) = & \frac{q\sqrt{\omega}}{2\lambda\sqrt{\pi} \times V_{\partial} \times (Z - Z_u)} \times \text{EXP} \left[-\frac{V_{\partial}(y - y_u)^2}{4\omega(Z - Z_u)} \right] \times \\ & \times \left\{ \Phi \left[(0,5b + |x|) \times \sqrt{\frac{V_{\partial}}{4\omega(Z - Z_u)}} \right] + \Phi \left[(0,5b - |x|) \times \sqrt{\frac{V_{\partial}}{4\omega(Z - Z_u)}} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (4.17)$$

де q – інтенсивність джерела нагрівання, Вт/м²;

ω – коефіцієнт теплопровідності м²/с;

V_{∂} – швидкість руху джерела нагрівання, мм/с;

x, y, z – координати по осі X, Y, Z , мм;

Z_u – розмір джерела (реального) у напрямку руху, мм;

b – ширина джерела, мм;

$\Phi(u)$ – функція інтеграла ймовірності.

Результати розрахунків дозволили побудувати ізотерми поля в різних перетинах щодо напрямку руху джерела нагрівання.

У порівнянні з одномірним джерелом розрахунки температурного поля від плоского швидкорухомого джерела викликає незрівнянно більші труднощі. Розрахунки поля в тривимірному просторі від джерел тепла, розподілених по деякій поверхні, приводить до завдання обчислення подвійних інтегралів. При зазначених розрахунках виникають значні утруднення, тому що інтегрування за часом приводить до невластивих інтегралів з нескінченною верхньою межею. Відомий ряд робіт, у яких початі спроби створення методики аналітичних розрахунків температурного поля від впливу плоского джерела [117, 119, 120]. Найбільш близьким за технологічними ознаками до процесів, розглянутих у

даній роботі, є розв'язок завдання по визначенню температурного поля, запропоновані професором А.Н. Резниковим [117, 118]. Для визначення температурного поля використовувався вираз, що описує процес поширення тепла від швидкорухомого джерела, що переміщається по поверхні тіла з не теплопровідною границею [118]:

$$\theta(x, y, z) = \frac{q}{2\pi\lambda(x - x_u)} \text{EXP} \left\{ -\frac{V[(y_u - y)^2 + Z^2]}{4\omega(x - x_u)} \right\}, \quad (4.18)$$

де $\theta(x, y, z)$ – елементарне підвищення температури, викликане в точці тіла з координатами x, y, z рухомої системи;

z_u, y_u – координати точкового джерела, що рухається разом із системою координат;

λ, ω – коефіцієнти тепло- і температуропровідності матеріалу.

Представляючи плоске джерело, як сукупність нескінченно великої кількості точкових джерел, вираз (4.18) необхідно проінтегрувати по z_u й y_u , щоб розрахувати повну температуру в точці з координатами x, y, z . Для обліку адіабатичності бічної поверхні заготовки, що нагрівається, впливає діюче джерело розміром $b \times l_s$ (рис. 4.9) доповнити відбиті джерелом такого ж розміру, але розташованим по іншу сторону осі OZ . У цьому випадку інтегрування по y_u буде виконуватися в межах від $y_u = -\ell_n$ до $y_u = +\ell_n$. У результаті перетворень вийде наступне вираз:

$$\begin{aligned} \theta(x, y, z) = & \frac{q}{2\pi\lambda} \int_0^{\Delta} dx_u \int_{-\ell_n}^{+\ell_n} \frac{dy_u}{x - x_u} \text{EXP} \left\{ -\frac{V[(y_u - y)^2 + z^2]}{4\omega(x - x_u)} \right\} = \frac{q\sqrt{\omega}}{2\lambda\sqrt{\pi} \times V} \int_0^{\Delta} \frac{dx_u}{\sqrt{x - x_u}} \times \\ & \times \text{EXP} \left[-\frac{VZ^2}{4\omega(x - x_u)} \right] \times \left\{ \Phi \left[(\ell_y - y) \sqrt{\frac{V}{4\omega(x - x_u)}} \right] + \Phi \left[(\ell_n + y) \sqrt{\frac{V}{4\omega(x - x_u)}} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (4.19)$$

де Φ – функція інтеграла ймовірності;

Δ – верхня межа інтегрування: $\Delta = x$ при $0 \leq x \leq l_s$,

$\Delta = l_s$ при $x \geq l_s$

Аналітично в представленому виді подвійний інтеграл (4.19) в елементарних функціях не обчислюється, а може бути визначений тільки

чисельними методами. Попередньо, перед чисельним інтегруванням, слід зробити заміну змінних:

$$X = \frac{x}{\ell_s}; Y = \frac{y}{\ell_n}; Z = \frac{z}{\ell_s}; X_u = \frac{x}{\ell}; Y_u = \frac{y_u}{\ell_n}$$

У результаті інтеграл (4.19) звівся до наступного [118]:

$$\theta(x, y, z) = \frac{IU\eta}{\pi\ell_s\lambda} \int_0^{\Delta^*} \text{EXP}\left(-\frac{V\ell_s Z^2}{4\omega(x-x_u)}\right) \frac{dX_u}{X-X_u} \times \int_0^1 \text{EXP}\left[-\frac{V(Y_u-Y)^2}{4\omega\ell_s(X-X_u)}\right] dY_u, \quad (4.20)$$

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

Слід зазначити, що $x_u = x$ – особлива точка під інтегральної функції. Інтеграл (4.20) при $x_u = x$ є невластним другого роду, але збіжним, тому що межа під інтегральної функції обох інтегралів у цьому випадку прагне до 0.

Розрахунки температурного поля відповідно до (4.20) проводився на ЕОМ по програмі, розробленій інженером В.Л. Самійленко. 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. 4.10).

Аналіз отриманих даних показує, що нагрівання поверхневого шару по всій висоті зуба забезпечує його рівномірний прогрів. Причому найбільш ефективним нагрівання виявляється в тому випадку, коли температура поверхні наближається до температури плавлення, але оплавлення ще не відбувається. У зв'язку з цим важливо визначити такі теплові режими, при яких відбувається більш повне використання можливостей плазмової дуги, як джерела нагрівання. Наприклад, при плазмово-дуговому зміцненні сталі 40Х у одному з випадків швидкість руху теплового джерела лише на 15% перевищує ту раціональну швидкість, при якій температура поверхні заготовки була близька до температури плавлення. Однак порівняння картин теплових полів показує, що ефективність нагрівання помітно знизилася.

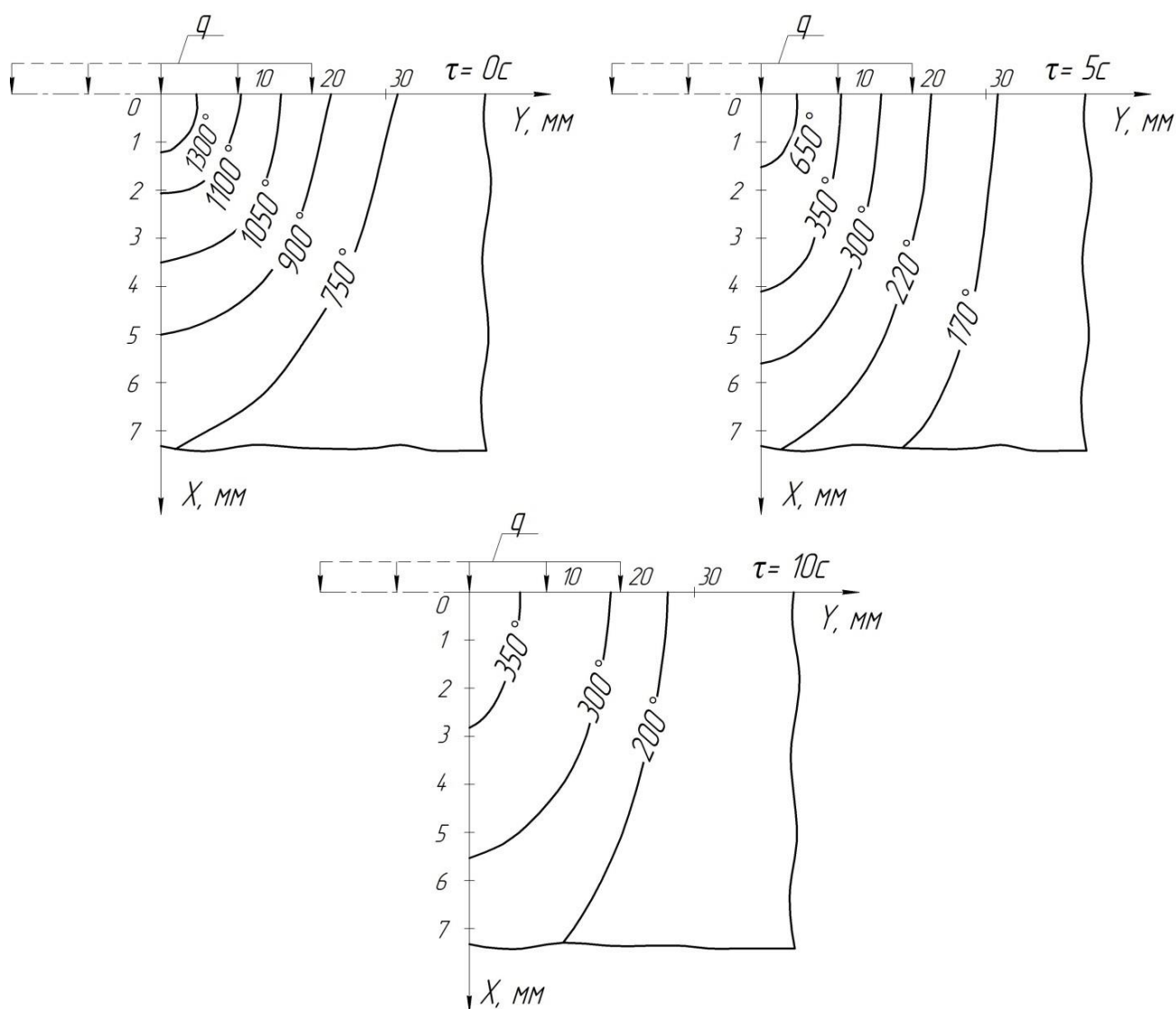


Рис. 4.10. Теоретичний розподіл температур при нагріванні лінійним джерелом ($V_0=400\text{ мм/хв}$, $I=300\text{ А}$, $U=120\text{ В}$, $\eta=40\%$, $q=3,4 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$)

Розрахунки термічних циклів дозволяють зробити висновок, що при раціональних параметрах плазмового нагрівання можна забезпечити більш глибоке проникнення максимальних температур. Наприклад, при ППДЗ сталі 40Х, навіть при відносній невеликій величині сили струму плазмової дуги $I = 150\text{ А}$, можна задати таке співвідношення розмірів теплового джерела, його потужність переміщення, при якому температура початку фазових перетворень ($A_{c3}=780^\circ\text{С}$) може бути зареєстрована на глибині 5 мм і більш. Як показали подальші експерименти, розрахункові дані термічного циклу точок матеріалу

припуску при плазмовому нагріванні в умовах ППДЗ мають досить малу розбіжність (не більш 15%) з експериментальними.

4.3. Тепловкладення при поверхневому плазмово-дуговому зміцненні

При нагріванні твердих тіл будь-яким джерелом, у тому числі плазмовою дугою, не весь потік тепла, що виділяється пристроєм, поглинається об'єктом нагрівання. Досить значну частину тепла становлять різні втрати, а частку, що залишилася, за допомогою якої реалізується нагрівання, оцінюють за допомогою ККД теплового джерела.

Відповідно до запропонованого способу проведення калориметрування, розглянутому в пункті 2.3.1, тепла потужність джерела нагрівання визначалася по формулі [97]:

$$W = \frac{\Delta Q(C_g \times M_g + C_m \times M_m)}{\tau}, \quad (4.21)$$

де C_g – теплоємність гліцерину: $C_g = 2257,2$ Дж/(кг · град) (при 0°C),

$C_g = 2800,6$ Дж/(кг · град) (100°C);

C_m – теплоємність металу: $C_m = 0,64$ Дж/(кг · град);

τ – час нагрівання, хв.

У наступній серії експериментів повторювалася та ж послідовність дій, але зразок нагрівали до 340°C та встановлювали на стіл карусельного верстата. При остиганні до 300°C включалося плазмове джерело нагрівання й подача верстата. Потім зразок калориметрували й розраховували нове значення теплової потужності джерела. Коефіцієнт корисної дії визначався з виражень:

$$\eta = \frac{W_{пл} - W_{хол}}{U \times I} \times 100\%, \quad (4.22)$$

де I – сила струму плазмової дуги, А;

U – напруга в ланцюзі дуги, В;

$W_{пл}$, $W_{хол}$ – значення теплової потужності, отримані в першій й другій серіях досліджень, МВт.

Розрахунки ККД проводився при різних значеннях температури попереднього підігріву зразка в печі. Розмах коливань установлювався для всіх дослідів однаковим і становив 40 мм, витрата повітря – 2,5 м³/год.

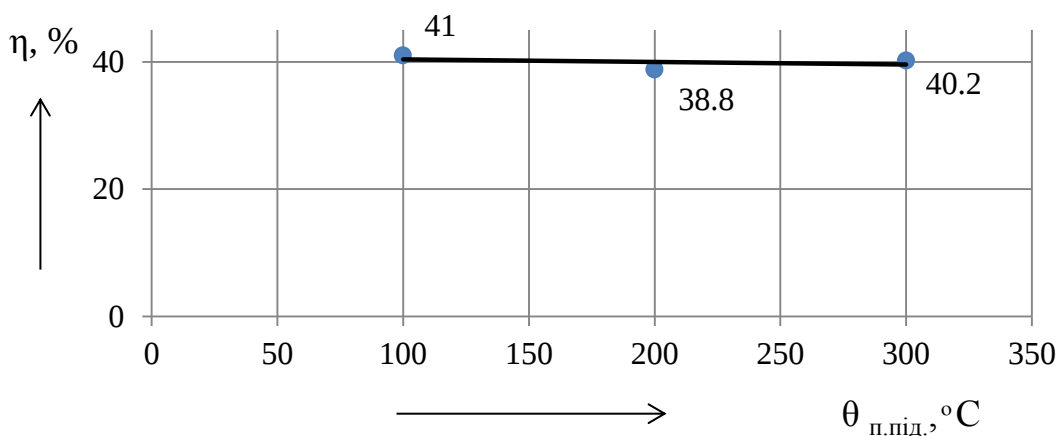


Рис. 4.11. Вплив температури попереднього підігріву заготовки на тепловий ККД наступного плазмового нагрівання

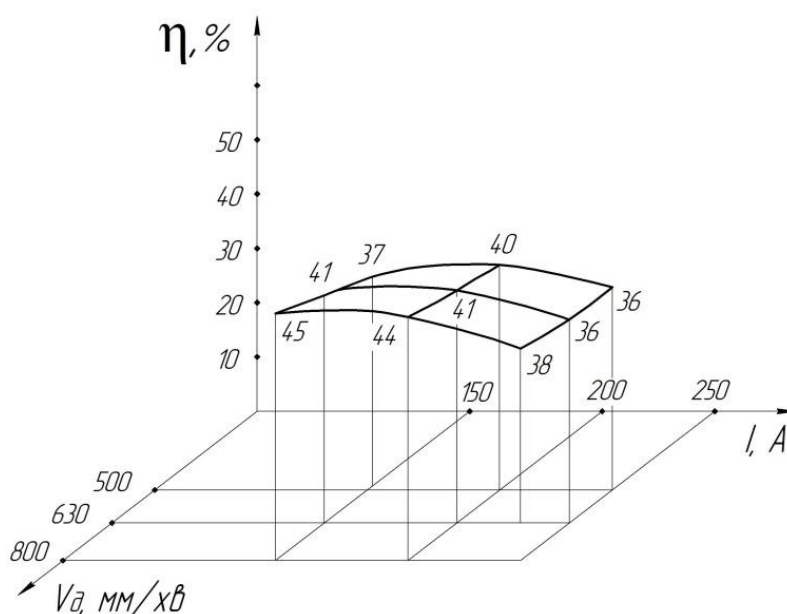


Рис. 4.12. Вплив параметрів нагрівання на величину теплового ККД

У результаті були отримані емпіричні залежності (рис. 4.11, 4.12). Їх аналіз показує, що ККД нагрівання в прийнятому діапазоні швидкостей переміщення й потужності плазмової дуги можна приймати в цілому 40%. Зниженням ККД зі зменшенням швидкості пояснюється втратами на розплавлення металу, часткове його розбризкування.

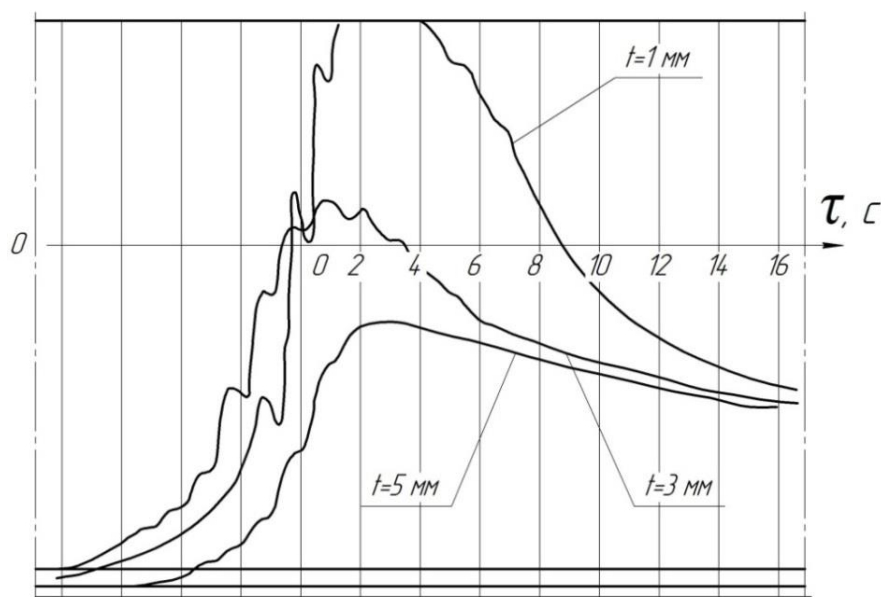


Рис. 4.13. Осцилограма термічного циклу, точки при плазмовому нагріванні

На рис. 4.13 показана осцилограма термічного циклу точок шару заготовки, що нагрівається, в процесі остигання, після проходження плазмової дуги, що сканує вздовж і поперек напрямку подачі. Пилкоподібний характер кривої в момент, коли термopapa перебувала безпосередньо під джерелом, свідчить про остигання металу на деяку величину в місці виміру, поки плазмова дуга в ході поперечного сканування переміщалася на інший край смуги нагрівання. Оцінка цього спаду температури важлива для ідеалізації джерела нагрівання при аналітичних розрахунках температурного поля, тому що у випадку значного $\Delta\theta$ (більш 200°C) слід уводити коефіцієнт імпульсного режиму. Значення $\Delta\theta$ залежить від частоти коливання плазмотрона поперек осі OZ , при збільшенні числа подвійних ходів у хвилину спад температури на краях смуги нагрівання зменшується. Наприклад, при $f_{\text{пл}} \geq 30$ дв. х/хв значення $\Delta\theta$ не перевищує $100\ldots150^{\circ}\text{C}$. це дозволяє зробити допущення про рівномірний розподіл інтенсивності в межах плями нагрівання, тому що в цьому випадку вплив $\Delta\theta$ не позначається на розподілі температур по глибині припуску.

На рис. 4.14, 4.15 показані картини температурних полів, побудованих за даними експериментів. Емпіричні значення температури для рис. 4.15 представлені за результатами роботи [121].

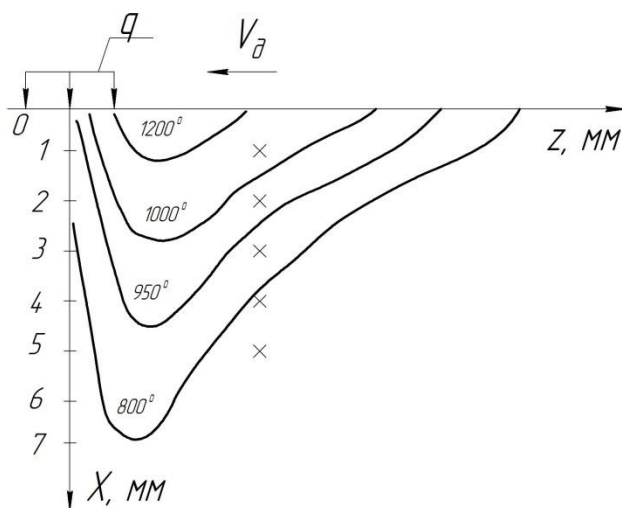


Рис. 4.14. Експериментальне визначення картини теплового поля при плазмовому нагріванні: сталь 40X, $V_d = 400$ мм/хв, $I = 250$ А

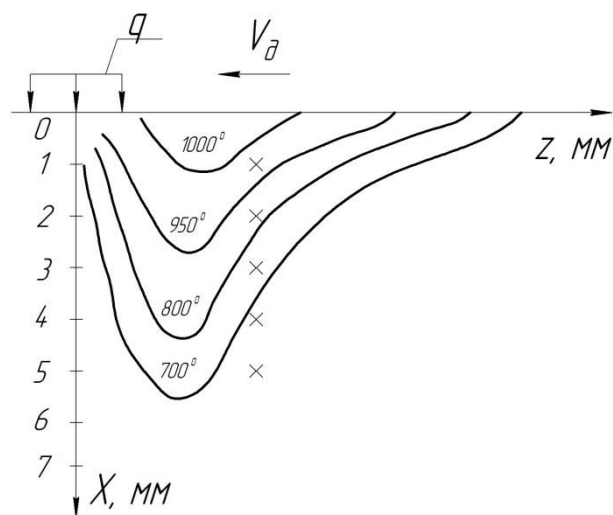


Рис. 4.15. Експериментальне визначення картини теплового поля при плазмовому нагріванні: сталь 40X, $V_d = 400$ мм/хв, $I = 180$ А

Порівняння розрахункових і експериментальних даних про температурні поля показало, що експериментальні й розрахункові криві термічних циклів найчастіше збігалися або відрізнялися на незначну величину, що є показником якості експерименту. Розбіжність можна віднести в основному за рахунок погрешностей у теоретичних передумовах.

При розгляді розподілу температур на ділянках, віддалених від задньої границі джерела нагрівання на відстань $Z \geq 10 \cdot 10^{-2}$ м, неважко помітити. Що по глибині припуску температура в значній мірі вирівнюється й приблизно рівняється температурі поверхні заготовки в цьому місці. Це має велике практичне значення при визначенні прискореним методом ступеня нагрівання припуску через певний час проходження джерела нагрівання, так як з'являється можливість безконтактного, дистанційного методу вимірів. Методика таких вимірів достатньо розроблена, добре вивчена й не викликає великих ускладнень у практичному використанні.

Розробка відносно нескладного, але досить надійного й точного способу контролю температури поверхні заготовки в процесі ППДЗ відкрила б гарні

перспективи для використання даного процесу в умовах гнучкого автоматизованого виробництва. З цієї точки зору заслуговують на увагу скануючі пірометричні датчики температурного поля, дія яких заснована на перетворенні в електричний сигнал оптичного випромінювання від нагрітої поверхні в інфрачервоному діапазоні [98, 99]. Потік випромінювання, що надходить від об'єкта, визначається його температурою й спектральними характеристиками випромінювання – ступенем чорноти й коефіцієнтом пропущення випромінювання оптичними елементами пристрою.

Експерименти з пірометром показали можливість стабільного контролю температури поверхні об'єкта, що нагрівається в межах 200...800°C. За результатами експериментів були побудовані залежності температури поверхні від режимів нагрівання. Змінними факторами в дослідженнях були: хвилинна подача S_m , сила струму плазмової дуги I .

4.4. Зміна фізико-механічних властивостей матеріалу від дії плазмової дуги, що сканує

Температурне поле, створюване в шарах припуску плазмовою дугою, що рухається по поверхні заготовки має більші температурні градієнти, процес нагрівання характеризується більшими швидкостями зміни температури.

Матеріал заготовки, що був підданий плазмовому впливу, випробовує деформації й напруги, тут відбуваються структурно-фазові перетворення.

Через це необхідно провести аналіз змін, що виникли у матеріалі припуску, щоб знати специфіку обробку металу зі зміненими властивостями.

Аналіз наявних літературних даних приводить до виводу про одночасне протікання під час плазмового нагрівання структурних змін, процесу пластичної деформації й ряд інших швидкоплинних процесів, які й забезпечують у сукупності свого прояву ріст міцністних характеристик поверхневого шару деталі.

4.4.1. Структурні перетворення при нагріванні плазмовою дугою, що сканує. Діаграми зміни температур, отримані з результатів теоретичного й експериментального дослідження теплових полів від впливу плоского швидкорухаючогося джерела, показують, що при обробці сталі 40Х глибина шару, що перетерпіла структурні зміни залежить від потужності джерела нагрівання, швидкості охолодження й теплофізичних властивостей матеріалу.

У дослідницьких роботах з кінетики зварювальних процесів, розрахунків глибини зварювальних напруг і деформацій, а також глибини загартованого шару приділяється велика увага [123], тому що це питання має важливе практичне значення для надійності роботи деталі.

Відповідно до рекомендацій [99], при представленні теплового джерела лінійним, і взявши за максимальну температуру значення її в точці A_{C3} , можна визначити найбільшу глибину проникнення заданої температури:

$$X = \frac{0,484 q}{V_{\partial} \times C_{\theta} \times \rho \times \theta_m}, \quad (4.23)$$

де q – питома інтенсивність джерела, Вт/м²;

V_{∂} – швидкість його переміщення, мм/с;

C_{θ} – теплоємність, Дж/(кг·град);

ρ – щільність матеріалу заготовки, (кг/м³);

θ_m – задана максимальна температура, °С.

Однак спроба розрахунків за допомогою цього виразу глибини загартованого шару від дії плазмової дуги, скануючої по двом координатам, показує різницю між експериментальними й розрахунковими даними, що досягає 20% і більш. Така збіжність свідчить про малу придатність формули (4.23) для випадку плоского джерела. Тому в рамках даної роботи теоретична глибина проникнення максимальних температур оцінювалася за допомогою виразу 5.6. Результати порівнювалися з даними експериментальних досліджень, метою яких була оцінка структурних перетворень і їх максимальної глибини з погляду одержання інформації про стан поверхневого шару після нагрівання. Характер структурних перетворень при плазмовому нагріванні матеріалу

визначається його маркою, вихідною структурою, максимальною температурою нагрівання й швидкістю охолодження.

На рис. 4.16 показаний зразок зі сталі 40X, поверхня якого піддалася плазмовому нагріванню. На торцевій поверхні макрошліфа проглядається у вигляді рівномірної світлої смуги шар, що відрізняється по травленості від основного металу.

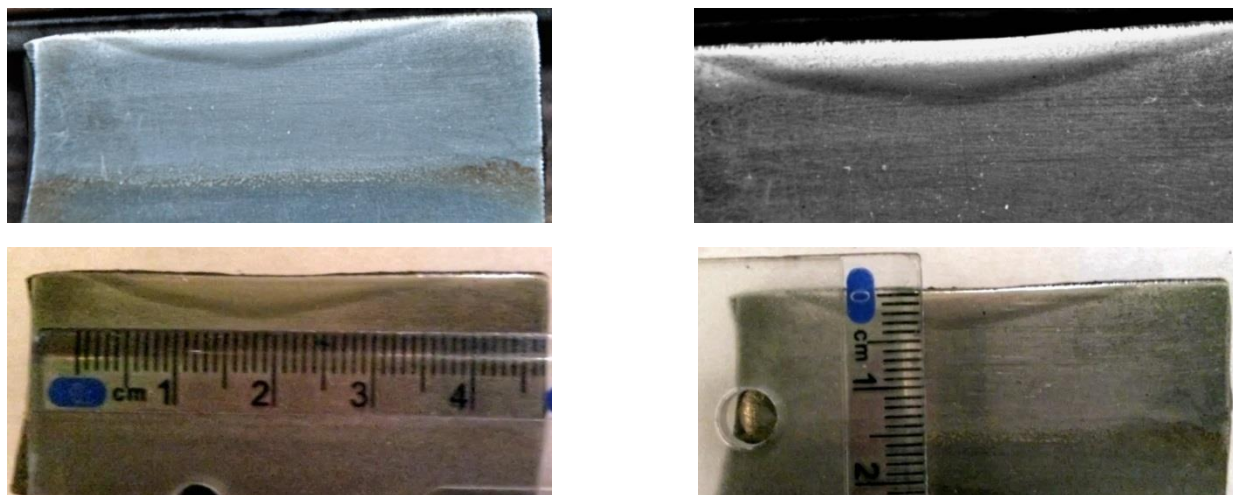


Рис. 4.16. Зразок підданий нагріванню скануючою плазмовою дугою

Аналіз термічного циклу, у результаті якого відбулися структурні перетворення, слід проводити при розгляді C – образних діаграм перетворення переохолодженого аустеніту (рис. 4.17). Показано, що якщо забезпечити охолодження шаром металу вище критичної швидкості загартування, то матеріал зберігає аустенітну структуру аж до точки M_H ($M_H = 210^\circ\text{C}$ для сталі 40X) [124, 125]. Але для цього необхідно нагріти припуск до температури A_{c3} . Отже, структура верхніх шарів припуску буде залежити від виконання умови $\theta \geq A_{c3}$. Тоді при температурі металу вище точки M_H нагрітий метал буде перебувати в аустенітному стані, а при більш низьких температурах структуру шару, що зрізується, будуть становити залишковий аустеніт і мартенситна фаза, що утворювався з аустеніту.

Аналіз експериментальних даних дозволив побудувати графік залежності глибини структурних перетворень від потужності джерела нагрівання й швидкості його переміщення (рис. 4.18) при постійних розмірах. Як з'ясувалося,

при ППДЗ сталі 40Х 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.

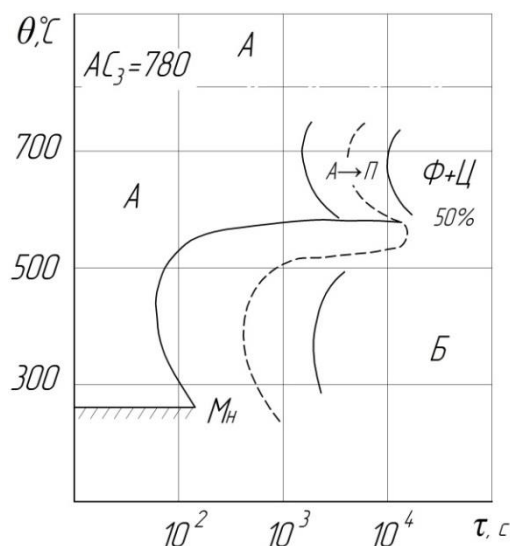


Рис. 4.17. Діаграма структурних перетворень переохолодженого аустеніту сталі 40Х

Для того, щоб спробувати пояснити явища, що відбуваються в більш глибоких шарах, слід повернутися до розгляду вихідної структури сталі 40Х, отриманої в результаті попередніх технологічних операцій виробництва заготовок (кування).

Заготовки, нагріті до температури A_{c3} і піддані деформуванню, при наступному остиганні проходять послідовно ряд етапів розпаду переохолодженого аустеніту (рис. 4.17): дифузійно-перлітне, проміжне (бейнітне) і бездифузійно - мартенситне. У результаті утворюється досить складна структура металу, що складається з верхнього й нижнього бейніту, мартенситу й залишкового аустеніту. Бейніт являє собою двофазну суміш кристалів фериту й цементиту. Ферит має низьку міцність і високу пластичність. При малому числі цементитних включень пластична деформація розвивається порівняно вільно й властивості матеріалу характеризуються невисокою твердістю. Якщо в результаті термообробки частки цементиту

укрупнюються, то звільняється деякі обсяги фериту для руху дислокацій, і здатність сталі до пластичної деформації збільшуються, тобто зростає пластичність. Відзначений факт має велике значення з погляду роззміцнення матеріалу, так як відомо, що коли рухома дислокація зустрічає нездоланні для неї включення, то вона через них проходить, залишаючи щораз дислокаційні петлі навколо включень. Чим більше накопичується петель, тим більше зміцнення [126].

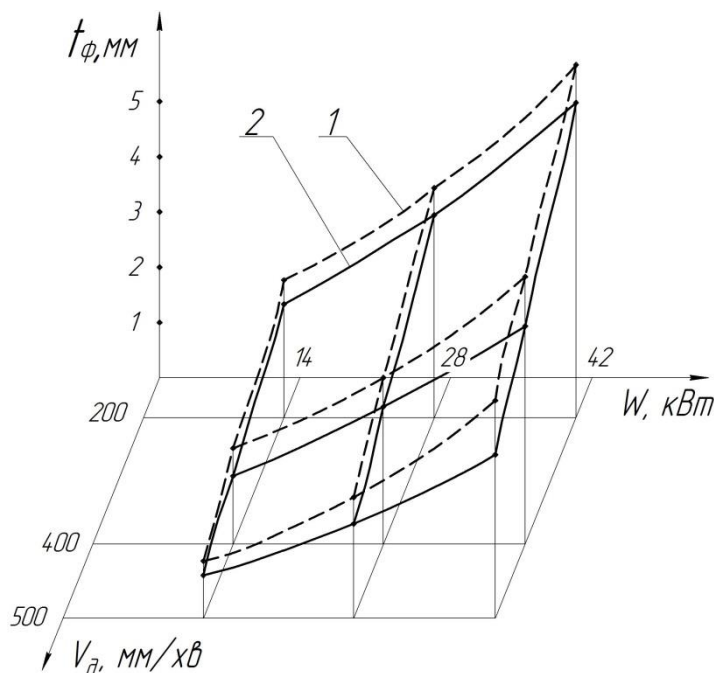


Рис. 4.18. Глибина зміцненого шару при нагріванні скануючою плазмовою дугою (сталь 40X): 1 – теоретична, 2 – експериментальна

У результаті високого нагрівання ($\theta > 500^\circ\text{C}$) шари металу, розташовані нижче аустенітної структури, отриманої в результаті плазмового нагрівання, перетерплюють високий відпуск. При цьому відбувається кілька процесів. Основний – розпад мартенситу, що полягає у виділенні вуглецю у вигляді карбідів, крім того, розпадається залишковий аустеніт, відбуваються карбідні перетворення й коагуляція карбідів, зменшуються недосконалості кристалічної будови L – твердої будови й залишкові напруження [125].

Якщо при повільному нагріванні зняття внутрішніх напружень і коагуляція карбідних часток відбувається в діапазоні $300\ldots 400^\circ\text{C}$, то при високошвидкісному нагріванні, до якого відноситься нагрівання плазмовою

дугою при ППДЗ, температура цих перетворень зміщується вгору по температурній шкалі. При цих температурах (500...700°C) зберігається тенденція падіння твердості, так само, як і інших показників міцності, тоді як показники пластичності (Ψ , δ) зростають.

З підвищенням температури відпуску укрупнюються цементитні частки (рис. 4.19), що може вести до збільшення пластичності матеріалу. При ППДЗ шари металу, що лежать на глибині 7...9 мм, хоча й не нагріваються вище A_{c3} , але проте, при певних режимах нагрівання, сюди можуть проникати температури 600...700°C. наприклад, при $V_d = 3 \cdot 10^{-3}$ м/с, розмірах джерела $l_s \times b = 0,05 \times 0,1$ і силі струму плазмової дуги $I = 390$ А, температура 600°C, як показує розрахунки, може проникати на глибину 9,8 мм.

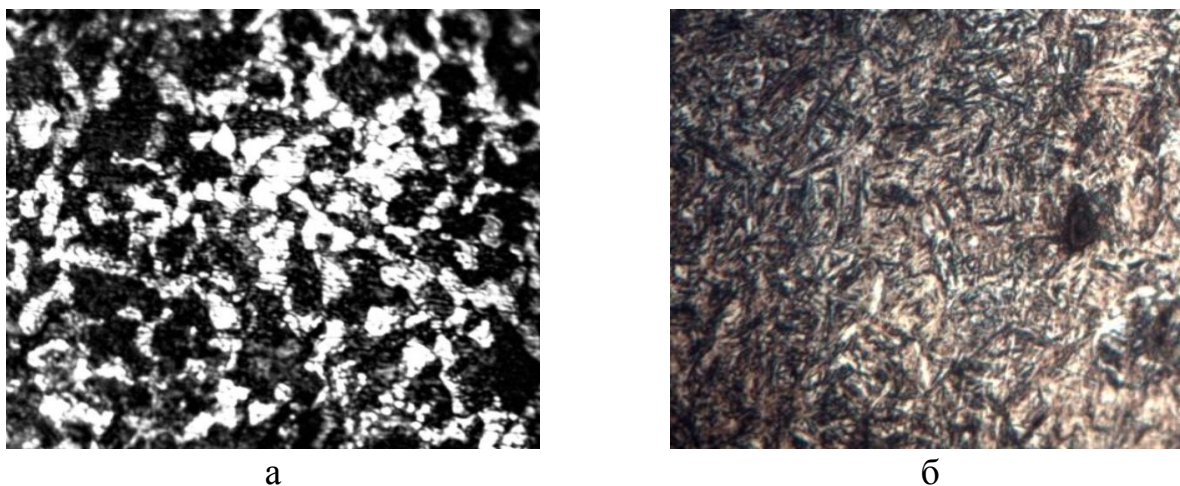


Рис. 4.19. Зміна структури сталі 40Х під впливом плазмового нагрівання, збільшення 1000^x:

а – вихідна структура, б – після плазмового нагрівання

Таким чином, наведені дані показують, що плазмовий підігрів поверхневого шару в умовах ППДЗ може суттєво змінити стан його структури, що може привести до значної зміни властивостей матеріалу у кращу сторону.

4.4.2. Зміна твердості шарів припуску в процесі охолодження й дослідження якості обробленої поверхні. Визначення наявності передумов створення умов нагрівання, достатніх для протікання необхідних структурних перетворень, при яких відбудеться також і термічне розміцнення матеріалу припуску, обумовлює необхідність оцінки даних процесів не тільки

металографічними методами після повного остигання заготовки, але й у процесі охолодження.

З набору механічних характеристик матеріалу, найбільш доступних для виміру в умовах високої швидкості процесу охолодження нагрітого припуску є твердість металу. Однак саме висока швидкість охолодження й короткочасність процесів, що протікають при цьому, є перешкодами для застосування стандартних методів виміру твердості. Тому, з метою вивчення властивостей середньолегованих сталей (на прикладі 40X) у процесі остигання, 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. 4.20). Аналіз графіків показав, що в процесі остигання відбувається зміцнення поверхневих шарів заготовки, нагрітих вище температури A_{c3} . причому різке збільшення твердості в сталі 40X починається при охолодженні до температури 200...230°C. Це пов'язано з особливостями C – образних діаграм даної сталі.

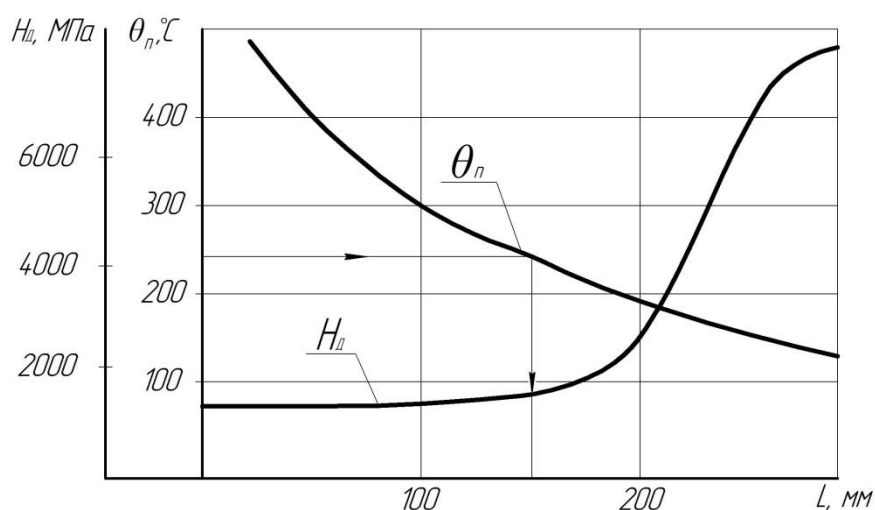


Рис. 4.20. Зміна температури й динамічної твердості в процесі охолодження після плазмового нагрівання

(сталь 40X; $I = 250\text{A}$, $V_d = 300\text{мм/хв}$; $d_c = 6\text{мм}$; $Q_{\text{пов}} = 2,5\text{м}^3/\text{год}$)

Варіювання швидкості нагрівання й охолодження не викликають змін в описаному процесі збільшення твердості, що відбувається через відносно низьку критичну швидкість зміцнення для сталі 40X, що забезпечує можливість

збереження переохолодженої аустенітної структури при більшості можливих термічних циклів в умовах ППДЗ.

Зниження динамічної твердості переохолодженого аустеніту може бути пояснено не тільки лише впливом температури. У цьому випадку це зв'язано, імовірно, зі зменшенням здатності аустеніту до деформаційного зміцнення при високій температурі, що пояснюють його нестабільним станом [126].

Відомо, що твердість зразків сталі, нагрітих плазмовою дугою в умовах ППДЗ, суттєво нижче, чим при нагріванні до тієї ж температури іншими джерелами тепла (відкритим полум'ям, у печі т.п.). Порівняння динамічної твердості зразків сталі 40X при повільному нагріванні в печі до температури випробувань (рис. 4.21) і при остиганні після плазмового нагрівання, свідчать, що при однакових температурах поверхні заготовок у діапазоні 220...300°C твердість може відрізнятися до 2,5... 3 рази. А аналіз розрахункових і експериментальних даних про температурне поле припуску показують, що для сталі 40X існує область комбінації параметрів нагрівання, що забезпечують необхідну температуру підігріву.

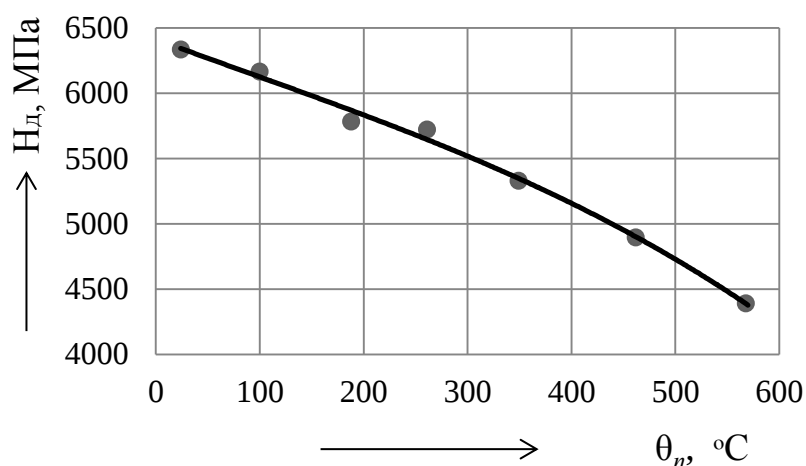


Рис. 4.21. Зміна динамічної твердості сталі 40X при нагріванні до температури випробувань у печі

Слід зазначити, що значення динамічної твердості перевищує значення статичної твердості. Причому відповідність значень динамічної й статичної твердості не постійне, а залежить від марки матеріалу.

При призначенні режимів нагрівання досліджувалася мікроструктура, мікротвердість (методика досліджень розглянуто в підрозділі 2.3.2) і залишкові напруги в поверхневих шарах.

Результати виміру мікротвердості представлено на (рис. 4.22). 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.

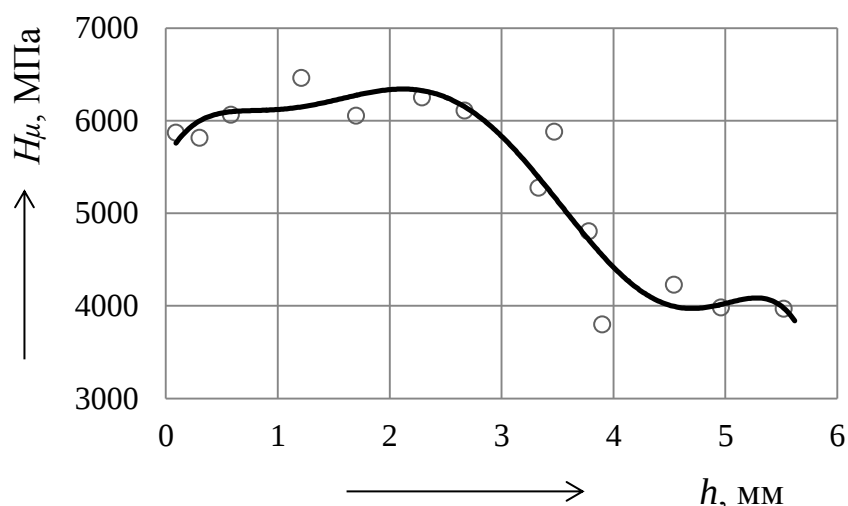


Рис. 4.22. Зміна мікротвердості поверхні після ППДЗ

Наявності мікротріщин у ході досліджень не було виявлено.

Аналіз результатів показав відповідність якості поверхні вимогам, пропонованим до оброблених поверхонь деталей.

4.5. Оцінка інтенсивності зношування зубчастих коліс після поверхневого плазово-дугового зміцнення

За прискореною методикою визначення абразивної зносостійкості зубів після ППДЗ, що наведена в підрозділі 2.4.3, випробовувалися зразки зубчастих коліс виготовлених зі сталі 40Х у наступному стані:

- вихідний стан – робочі поверхні зубів не піддані термічній обробці твердість HB 280;
- плазово-дугове зміцнення без оплавлення, твердість HRC 52.

На рисунку 4.19 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. Для повноти картини й наочності експеримент проводився з оцінкою величини зношування від часу не загартованого зубчастого колеса, а потім аналогічного загартованого зубчастого колеса. Дані занесені в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2

**Експериментальні дані лінійного зношування робочих поверхонь
зубчастих коліс по ділильному діаметру**

Час роботи, хв.	Зношування не загартованого колеса ΔS_1 , мм	Зношування колеса підданого ППДЗ ΔS_2 , мм
0	0	0
30	0,017	0,008
60	0,059	0,015
120	0,073	0,029
150	0,09	0,036
180	0,121	0,053

Випробування показали, що ППДЗ легованих сталей (40Х) приводить до підвищення його абразивної зносостійкості в 2,28 рази, що можна пояснити структурою зміцнення, утворенням мартенситу й підвищенням твердості.

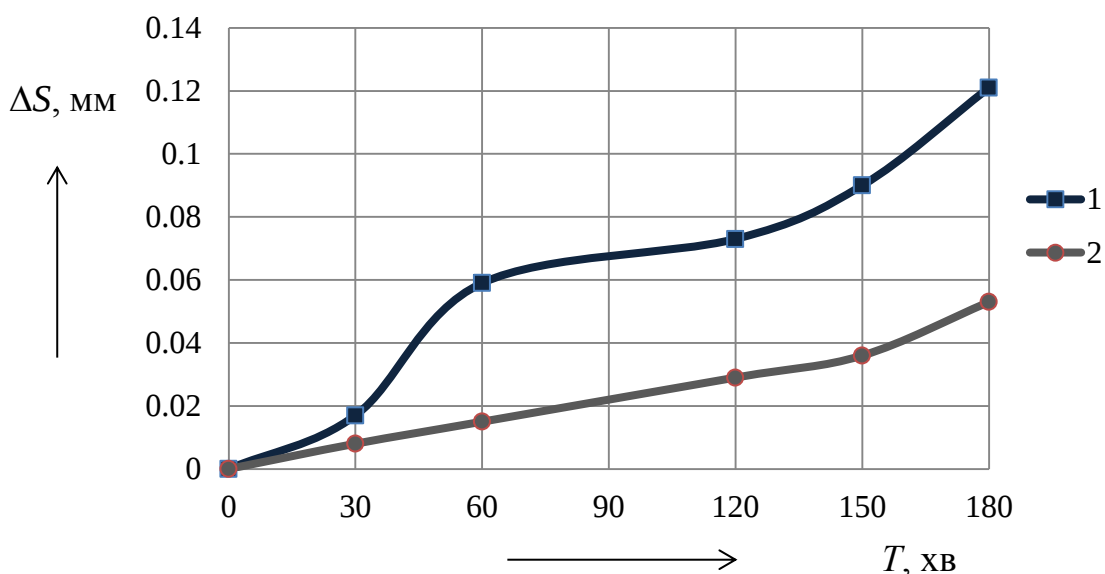


Рис. 4.19. Залежність інтенсивності абразивного зношування ΔS зубчастих коліс від часу T : 1 – зношування не загартованого зубчастого колеса;
2 – зношування зубчастого колеса підданого ППДЗ

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.

Висновки до розділу 4

1. Виконані експериментальні дослідження зношування зубів відкритих зубчастих передач рудорозмельних млинів. У результаті обробки й аналізу експериментальних даних отримані усереднені величини, що характеризують різні етапи зношування. Установлена залежність швидкості зношування від величини зношування зубів. Зіставленням експериментальних швидкостей зношування з розрахунковими величинами, що характеризують геометрію й кінематику зачеплення, виділений параметр, що враховував абразивний вплив середовища й фізико-механічні властивості матеріалів зубів для даних умов експерименту. Останнє дозволило обґрунтувати застосування існуючих закономірностей абразивного зношування для інженерних розрахунків зношування відкритих зубчастих передач рудорозмельних млинів.

2. На підставі експериментальних даних і розробленого методу розрахунків встановлено, що граничні величини зношування зубів шестірні й вінця повинні визначатися економічними міркуваннями. Граничне зношування шестірні обмежене періодом, що встановився, зношування для досліджуваних передач становить 3...4 мм. Збільшення допустимої величини зношування, приводить до роботи в період катастрофічного зношування й значного скорочення терміну служби передачі. Припустима величина зношування кожної робочої поверхні зубів вінця визначається припустимим зниженням довговічності шестірні. Починаючи з певної величини встановлюваної розрахунками або дослідом у період експлуатації, довговічність шестірень на стільки знижується, що подальша експлуатація вінця недоцільна. Ця величина становить приблизно 4...5 мм із кожної поверхні зуба.

3. Аналіз результатів розрахунків і експериментального дослідження теплових процесів, що відбуваються в матеріалах під впливом плазмового нагрівання, і теплових полів, зроблених при різних розмірах джерела нагрівання, дозволяють зробити наступні висновки:

3.1. В умовах ППДЗ ефективність плазмової дуги, як джерела нагрівання, суттєво залежить від співвідношення розмірів теплового джерела, його швидкості й теплової потужності; раціональним слід вважати таке їхнє співвідношення, при якому температура поверхні, що нагрівається, на задній границі плями нагрівання досягає, але не перевищує температури плавлення для даного матеріалу.

3.2. У процесі нагрівання й охолодження поверхневі шари металу зазнають різних термічних циклів, внаслідок чого відбуваються структурні перетворення в одних випадках, або теплове розміцнення в інших, підвищується пластичність оброблюваного матеріалу.

3.3. ККД процесу нагрівання скануючою у магнітному полі плазмовою дугою дорівнює 40%, причому ККД не залежить від температури припуску, що існувала на момент плазмового нагрівання.

3.4. Експериментами встановлене, що з достатньою точністю (15%) характеристика температурного поля заготовки може бути зроблена аналітично при представленні джерела нагрівання плоским з рівномірним законом розподілу інтенсивності.

3.5. Аналіз структурно-фазових перетворень показав, що деталі піддані ППДЗ, мають високу поверхневу твердість та пластичність, це є важливими експлуатаційними показниками, які впливають на працездатність зубчастого зачеплення.

3.6. Проведені експериментальні дослідження, у результаті яких отримані дані для оцінки зносостійкості залежно від поверхневої твердості робочих поверхонь зубчастих коліс. ППДЗ зубчастих коліс сприяє підвищенню їх абразивної зносостійкості більш ніж в 2 рази.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНОЛОГІЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ВЕЛИКОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

5.1. Технологія та обладнання поверхневого зміцнення зубів плазмовою дугою, що сканує

При плазмовому поверхневому зміцненні 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. Досвід створення подібних дугових нагрівальних пристроїв, і тим більше із застосуванням електромагнітного сканування, у цей час відсутній.

Критеріями стабілізації процесу повинні бути: стійкість роботи обладнання для реалізації процесу, достатня довговічність його змінних елементів (катодної вставки, сопла плазмотрона); максимальні технологічні можливості – ширина, глибина зміцненого шару, продуктивність процесу зміцнення, а також зручність їх регулювання в широких межах.

При цьому не виникають проблеми об'єктивної і оперативної оцінки наслідків плазмово-дугового нагрівання в процесі роботи. Наприклад, рівномірність прогріву зміцненого шару можна оцінити за допомогою таких традиційних руйнівних методів як металографічний і мікротвердості. Присутність окремих точок оплавлення на поверхні свідчить про зайво велику амплітуду сканування дуги й непостійності її контакту з виробом через високу швидкість у площині сканування.

Таким чином, використовуючи перераховані критерії в підрозділі 2.1, усі конструктивні й енергетичні параметри процесу ППДЗ можуть бути досліджені експериментально й стабілізовані на раціональному рівні.

Спосіб ППДЗ великомодульних зубчастих коліс включає нагрів без оплавлення плазмовою дугою бічної поверхні зуба із заданою силою струму. Нагрівання здійснюється дугою, спрямованою фронтально до середини робочої частини профілю зуба під кутом $70^{\circ} \dots 90^{\circ}$ і коливної відносно свого середнього положення із частотою зовнішнього змінного електромагнітного поля поперек поздовжньої лінії зубів, з амплітудою, що дорівнює висоті зуба, при цьому переміщення дуги проводять поступально від одного торця зубчастого колеса до іншого, зі швидкістю, що перевищує швидкість поширення температури в даному матеріалі.

Даний спосіб пояснюється схемою (рис. 5.1, а), на якій показано розташування джерела нагрівання й зон нагрівання в торцевій площині оброблюваного зубчастого колеса. У якості джерела плазмового нагрівання, обрано плазмотрон прямої дії, який складається з охолоджуваного водою корпусу 1 із соплом 2, електрода (катода) 3, каналу підведення плазмотворювального газу. Плазмотрон оснащено магнітною системою, що складається з двох охолоджуваних магнітопроводів 4 (система охолодження не показана), торці яких розташовано біля сопла 2 і перпендикулярні напрямку поздовжньої лінії зубів, електричної котушки 6, установленної на магнітопроводах 4 і приєднаних до регульованих джерел живлення змінного струму.

Спосіб реалізується наступним чином. Зубчасте колесо або вал-шестірня встановлюються на верстаті, генератором плазми є однодуговий плазмотрон постійного струму. Плазмоутворювальний газ – повітря. По розташуванню плазмової дуги щодо дугового каналу, а також по характеру впливу дуги на оброблюваний матеріал, він відноситься до плазмотронів прямої дії. Зниження локальності нагрівання плазмової дуги здійснюється за рахунок накладення на потік генеруємої плазми зовнішнього змінного магнітного поля. Для створення зовнішнього магнітного поля, плазмотрон прямої дії 1 (ПВР-402М), що серійно випускається, оснащують спеціальною магнітною системою. Плазмотрон генерує електричну дугу, яка горить між катодом 3 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 являє собою провідник 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. Таким чином, зміною напруги на котушці 6 магнітної системи забезпечується можливість зміни величини сили Лоренца, а отже, змінюється величина відхилення електричної дуги в магнітному полі, що дозволяє переміщати пляму нагріву дуги по поверхні западини між зубами. 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 як би витягується уздовж робочої поверхні зуба 5.

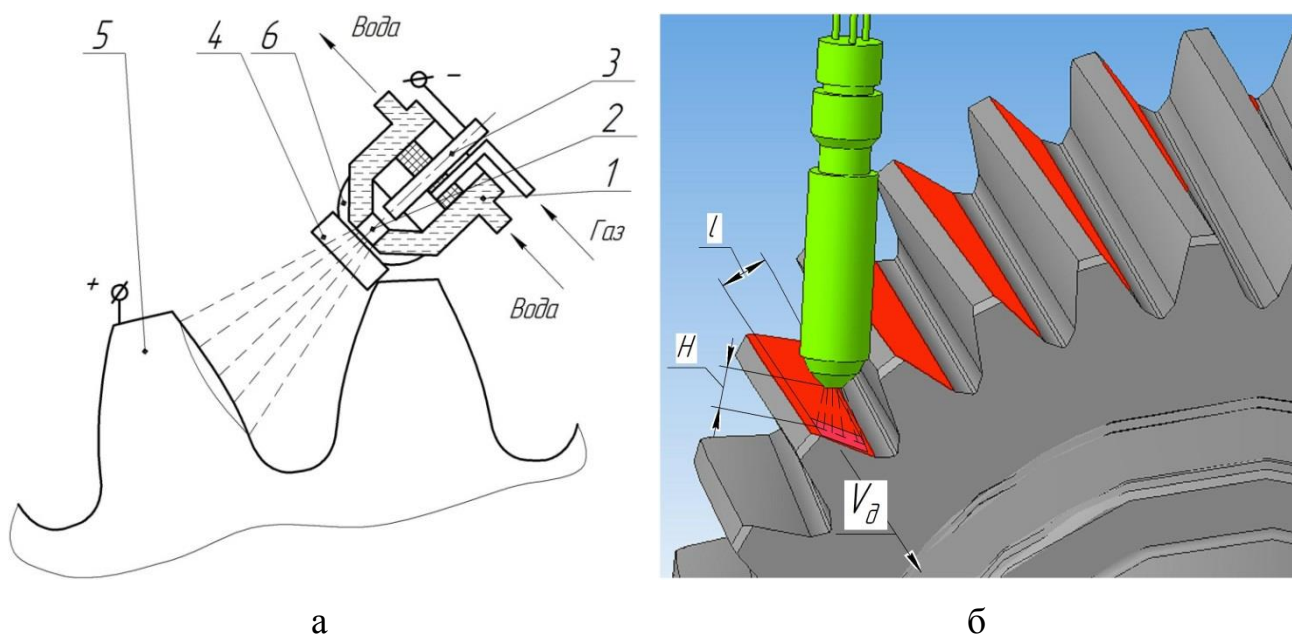


Рис. 5.1. Схема пристрою:

а – вид в площині обробки; б – просторовий вид процесу обробки

($H = 45 \dots 60$ мм; $l = 35 \dots 65$ мм; $d_c = 5,5$ мм; $Q_{\text{пов}} = 2,5 \text{ м}^3/\text{год}$)

При реалізації даного способу для великомодульних зубчастих коліс розтягують пляму нагріву по всій робочій поверхні зуба, не зачіпаючи вершину й западину зуба, оскільки вони не беруть участь у зачепленні. Вплив плазмовою дугою фронтально під заданим кутом дозволяє забезпечити найбільше

вкладення тепла в матеріал заготовки, оскільки менше значення кута приводить до збільшення відбиття теплового потоку в повітря й зниженню ККД нагрівання нижче 40%, що неприпустимо для умов гартування. При цьому амплітуда сканування плазмової дуги становить 0,7...0,8 висоти зуба. Менше значення амплітуди встановлюють для зубчастих коліс із модулем $m \leq 15$, щоб уникнути перегріву вершини зуба після закінчення його термообробки по обидва боки. Крім того даний діапазон пояснюється тим, що при нагріванні по всій висоті лівого зуба, а потім правого в зоні западини виникають перехресні нерівномірно термічно оброблені ділянки, що приводить до несприятливих термічних напруг. Тому доцільно не прогрівати нижню частину западини.

Задавати більшу амплітуду коливань дуги, рівну висоті зуба або вище її, недоцільно також і тому, що горіння дуги може стати нестійким і вона може згаснути. Повторне ж екстрене включення плазмової дуги приводить до оплавлення поверхні деталі в момент запалювання дуги, що є неприпустимим, оскільки приводить до браку.

Переміщення уздовж робочої поверхні зуба (рис. 5.1, б), плазмової дуги, що сканує, здійснюють за рахунок механізму подачі верстата зі швидкістю (V_d), що перевищує швидкість поширення тепла в даному конкретному матеріалі заготовки, це забезпечує критичну швидкість зміцнення в поверхневому шарі без охолоджуючих засобів, у вигляді води або мастила. У підсумку на робочій поверхні зуба виникає загартований шар глибиною 4...5 мм, твердістю HRC 61...63 одиниці, що відповідає вимогам, які пред'являються до приводів даного типу.

Для реалізації способу плазмово-дугового зміцнення великомодульних зубчатих передач був створений дослідно-промисловий комплекс на базі токарного верстаті 1A660, конструктивні особливості якого дозволяють розміщувати над станиною заготовки діаметром до 1250 мм. У кінематичній схемі верстата був модернізований привід швидкого переміщення супорту, шляхом установки перетворювача частоти фірми Delta Electronics – VFD 007 EL43A ($N = 0,2...3,7$ кВт). Це дало можливість у широких межах змінювати

швидкість лінійного переміщення плазмотрона вздовж поверхні заготовки. Маніпулятор із плазмотроном встановлюється в різцетримач. Реверс плазмотрона в вихідне положення здійснюється рукояткою швидких переміщень верстата. Деталь встановлюється в центрах верстата, циклічне обертання для переміщення нового зуба в зону нагрівання здійснюється вручну до упору. Для виключення небезпеки оплавлення заготовки в момент запалювання плазмової дуги, використовувався накладний фальш-анод у вигляді пластини зі сталі 10 товщиною 20 мм, який фіксувався на торці заготовки за допомогою постійних магнітів. Фальшаноди встановлюють в тих випадках, коли на початку або в кінці ходу можливе замикання ланцюга плазмотрона не через заготівку, а через деталі пристосування і верстата, або розмикання ланцюгу струму, що приводить до гасіння дуги.

Установка для реалізації способу ППДЗ містить:

4. Плазмова установка АПР-402 (технічні характеристики наведені в табл. 5.1).
5. Плазмотроном ПВР-402М з укріпленням на ньому електромагнітним сканером (рис. 5.2), технічна характеристика плазмотрона наведена в табл. 5.2.
6. Регульований трансформатор змінного струму для створення напруги в магнітній системі.

Таблиця 5.1

Технічні характеристики установки АПР-402 для плазмового зміцнення

Характеристика	Значення
Напруга живлення, В	3х380
Сила номінального робочого струму, А	400
Межі регулювання робочої сили струму, А	200 ... 500
Питома потужність, кВт	128
Номінальна умовна робоча напруга, В	270
Напруга холостого ходу, В	320
Плазмоутворювальний газ	Повітря
Тиск на вході, МПа	0,5 ... 0,6
Витрати повітря, л/с	0,70 ... 1,95
Тиск охолоджуючої води, МПа	0,15 ... 0,3
Витрати охолоджуючої води, л/с	0,083
Маса джерела живлення, кг	1040
Габарити джерела живлення, мм	1040х1706х880

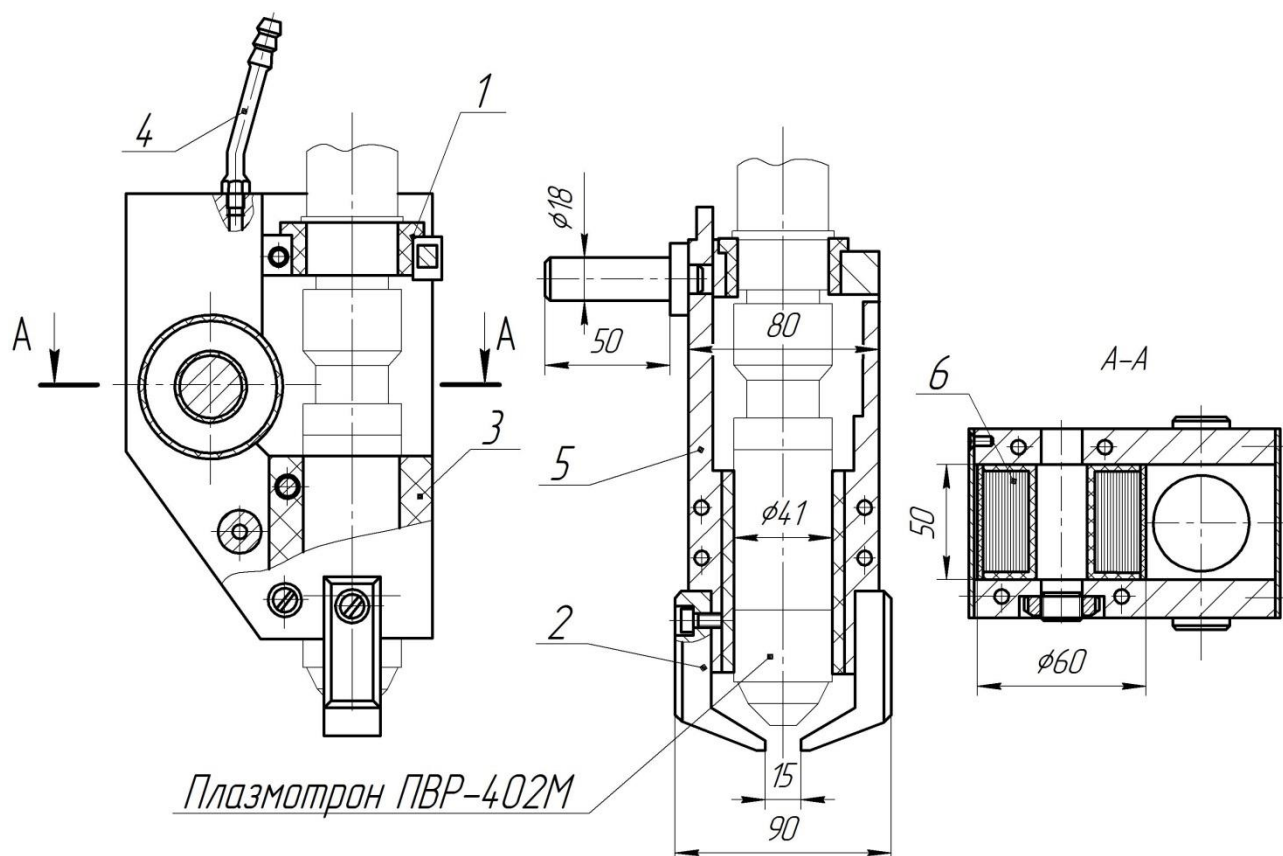


Рис. 5.2. Загальний вид плазмотрона з магнітно-відхиляючою системою:

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

Таблиця 5.2

Технічні характеристики плазмотрону ПБР-402М

Характеристика	Значення
Рід струму	Постійний
Плазмоутворювальний газ	Повітря, кисень
Тиск газу на вході в плазмотрон, МПа	0,25 ... 0,6
Витрати повітря, л/хв	70 ... 170
Охолодження плазмотрону	водяне
Витрати води, не менше, л/хв	5,0
Тиск води на вході в плазмотрон, МПа	0,15 ÷ 0,3
Маса плазмотрону, не більше, кг	1,5

Загальний вид плазмотрона з магнітно-відхиляючою системою в процесі обробки [82] великомодульної вал-шестірни ($m = 22$) в умовах виробництва представлено на рис. 5.3.



Рис. 5.3. Процес обробки вал-шестірни методом ППДЗ в умовах виробництва

5.2. Вибір раціональних параметрів нагрівання при поверхневому плазово-дуговому зміцненні

Аналізуючи процес нагрівання в умовах ППДЗ, слід помітити, що він містить у собі параметри, які піддаються регулюванню в досить широких межах, установлених технологічними можливостями застосовуваного обладнання. До таких параметрів відносяться: сила струму плазової дуги I , довжина джерела нагрівання в напрямку руху l_s , його ширина b_n , швидкість руху джерела V_u .

Співвідношення розмірів джерела й величини сили струму дуги визначають значення інтенсивності q_s [115]:

$$q_s = \frac{I \times U \times \eta}{l_s \times b_n}, \quad (5.1)$$

де U – напруга в ланцюзі плазової дуги, В;

η – ККД джерела нагрівання, $\eta = 0,4$;

l_s, b_n – розміри джерела нагрівання, мм.

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.

Раніше вже зверталася увага на неприпустимість оплавлення поверхневого шару заготовки. Тому при встановленні параметрів нагрівання слід прагнути до того, щоб температура поверхні заготовки на задній границі джерела досягалася, але не перевищувала точки плавлення для даного матеріалу, тобто повинна виконуватися умова $\theta_n \leq \theta_{\max}$.

Як відомо [118], фактичні температури, що мають місце в конкретних умовах у той або інший момент часу τ , можуть бути отримані, якщо є дані про довжину джерела, швидкості його переміщення й максимальному значенні температури $\theta_{\max}$, яка для смугового швидкорухомого джерела визначиться з вираз:

$$\theta_{\max} = \frac{2q\sqrt{\omega \times \ell_s}}{\lambda \times \sqrt{\pi \times V_o}}, \quad (5.2)$$

де q – інтенсивність джерела, Вт/м²;

λ, ω – відповідно, коефіцієнти тепло- і температуропровідності матеріалу;

V_o – швидкість переміщення джерела, мм/хв, $V_o = S_m$.

Вважаючи, що $\theta_{\max}$ дорівнює температурі плавлення, виразимо з формули (5.2) швидкість переміщення джерела V_o , при якій буде виконуватися умова $\theta_n \leq \theta_{\max}$:

$$V = \left(\frac{2q}{\theta_{nl} \times \lambda} \right)^2 \times \frac{\omega \times \ell_s}{\pi}, \quad (5.3)$$

Підставивши замість q вираз (5.1), одержимо формулу для визначення швидкості руху джерела нагрівання з умови нерозплавлення поверхневого шару заготовки [80]:

$$V_o = \left(\frac{I \times U \times \eta}{\theta_{nl} \times \epsilon_n \times \ell_s \times \lambda} \right)^2 \times \frac{\omega \times \ell_s}{\pi}, \quad (5.4)$$

Для уніфікації формул, що описують термічний цикл, їх представляють звичайно у вигляді виражень, що містять безрозмірний час і температуру [99, 117], що дозволяє перейти до безрозмірних термічних циклів. Останні дані в безрозмірній системі координат для точок, розташованих на різній глибині щодо площини, по якій переміщається джерело. Тоді глибина розташування точки буде характеризуватися безрозмірною ординатою v :

$$v = \frac{1}{4} \times \left(\frac{y}{\ell_s} \right)^2 Pe = \frac{y^2 \times V_o}{4\ell_s \times \omega}, \quad (5.5)$$

де y – фактична ордината розглянутої точки;

ℓ_s – довжина джерела в напрямку руху;

Pe – критерій Пекле;

V_o – швидкість руху джерела.

При обробці з плазмовим нагріванням матеріалів, здатних витримувати структурні перетворення під впливом температури, значний практичний інтерес

представляє оцінка глибини проникнення X тієї або іншої максимальної температури. Методика подібної оцінки, яка зв'язує потужність, швидкість і розміри джерела нагрівання, була запропонована М.А. Шатеріним [115], який в якості вихідні положень інтерпретував формули, наведені в роботах [117, 118]. Відповідно до зазначеної методики, при заданих розмірах джерела і його потужності, швидкість переміщення встановлюють відповідно до $\theta_n \approx \theta_{пл}$. При цьому максимальною буде температура поверхні під задньою границею теплового джерела. Для визначення глибини проникнення якої-небудь іншої конкретної температури виразимо X з формули (5.5) [80]:

$$X = \sqrt{\frac{4\omega \ell_s v}{V}} \quad (5.6)$$

Значення v визначається із кривих безрозмірних термічних циклів $\tau(\psi, v)$ [118]:

$$\tau = \frac{1}{2} \int_0^\psi \frac{d\mu}{\sqrt{\psi - \mu}} \text{EXP} \left[-\frac{v}{\psi - \mu} \right] \quad (5.7)$$

де τ – безрозмірна температура (на поверхні в межах джерела нагрівання);

ψ – безрозмірна абсциса точки в системі координат, що рухається разом із джерелом: $\psi = z / \ell_s = 1$, т. до $Z = l_s$.

Величина v знаходиться таким чином. Спочатку визначають безрозмірну температуру τ , яка дорівнює відношенню значення температури θ_y , глибину найбільшого проникнення якої ми шукаємо, до температури плавлення для даного матеріалу. Відклавши отримане значення на осі ординат, приводимо вправо лінію до перетинання з останньою кривою $\psi = 1$ графіка $\tau(\psi, v)$. Абсциса отриманої точки перетинання і є шуканим значенням v .

Викладена методика дозволяє встановлювати швидкість руху джерела з метою забезпечення проникнення заданої температури на задану глибину при рівномірній швидкості руху.

На віддаленні від джерела нагрівання температура поверхневого шару вирівнюється й може оцінюватися по температурі поверхні заготовки. Значення температури для точки, що лежить на поверхні:

$$\theta = \theta_{\max} \times \theta^*, \quad (5.8)$$

де θ^* – безрозмірна температура;

$\theta_{\max}$ – найбільша температура нагрівання: $\theta_{\max} = \theta_{\text{пл}}$.

$$\theta^* = \sqrt{\mu} - \sqrt{\mu - 1}, \quad (5.9)$$

де μ – безрозмірний час: $\mu = \frac{L}{\ell_s}$

L – відстань від точки на поверхні до передньої границі джерела нагрівання.

$$\theta^* = \sqrt{\frac{L}{\ell_s}} - \sqrt{\frac{L - \ell_s}{\ell_s}} \quad (5.10)$$

У такому вигляді формули 5.4, 5.6 досить прості й придатні для практичного використання, але для полегшення аналізу взаємозалежності параметрів, що входять у них і також для практичного налагодження верстатів корисно вдатися за допомогою до номограм.

Застосування номограм доцільно з погляду зручності користування й аналізу функціональних різних залежностей, вони дозволяють дати не тільки наочну геометричну інтерпретацію яким-небудь раніше відомим властивостям номографованої формули, але й установити невідомі раніше її особливості, [122].

Відповідно до цього була зроблена спроба, представити у вигляді номограм вплив потужності й розмірів джерела на вибір швидкості його переміщення, на глибину проникнення максимальних температур, визначаючи при цьому, як буде змінюватися температура поверхні, що нагрівається заготовки.

У таблиці 5.3 наведені вихідні дані для побудови у вигляді початкового й кінцевого значення змінного параметра, а також кроку варіювання.

Усі існуючі номограми складаються з елементів двох типів: шкал і сімейств позначених ліній, що утворюють іноді сітки – бінарні поля.

Відповідно до цього, у правій верхній частині номограми (рис. 5.3) представлена елементарна номограма з вирівняних точок з паралельними шкалами й бінарним полем для опрацювання V з рівняння 5.4. Значення V знаходиться накладенням лінійки на шкали b і l_s , як це схематично показано в нижній частині «ключ» номограми. Із точки перетинання лінії з гіперболічною кривою, що відповідає обраному значенню l_s , опускається перпендикуляр до осі V , який дасть значення швидкості переміщення джерела нагрівання, при якій відсутнє розплавлювання поверхні.

Таблиця 5.3

Вихідні дані для оптимізації нагрівання при ППДЗ

№	Параметр	40X			45Г		
		P_n	P_k	H_p	P_n	P_k	H_p
1.	Довжина джерела l_s , м	0,02	0,05	0,01	0,02	0,05	0,01
2.	Ширина джерела b , м	0,02	0,1	0,02	0,02	0,1	0,02
3.	Сила струму дуги I , А	150	390	120	150	390	60
4.	К-т теплопровідності, λ , Вт/м·град	42,3			41,9		
5.	К-т температуропровідності, ω , м ² /с	$10,5 \cdot 10^{-6}$			$10,3 \cdot 10^{-6}$		
6.	Температура плавлення	1500°C			1500°C		

Для визначення глибини температури проникнення, у правій нижній частині побудована ще одна елементарна номограма з орієнтованим транспарантом для формули 5.6. Сімейство паралельних прямих, відповідних до різних значень l_s , являють собою нерухливу площину (а, б) – транспарант.

Ключ користування номограмою також схематично зображений на кресленні номограми. Потрібно визначити «х» за заданими значенням b , обраному l_s , і отриманому V з попереднього етапу. Накладаємо лінійку-транспарант на нерухливу площину так, щоб верхній край транспаранта збігався із прямою, відповідної до значення l_s . Тоді поділки транспаранта в °C покажуть, на якій глибині від поверхні були дані температури.

При зміні значення b у бік збільшення, транспарант буде переміщатися вліво, приходячи послідовно всі значення b від початкового до кінцевого, відповідно до прийнятого кроку варіювання.

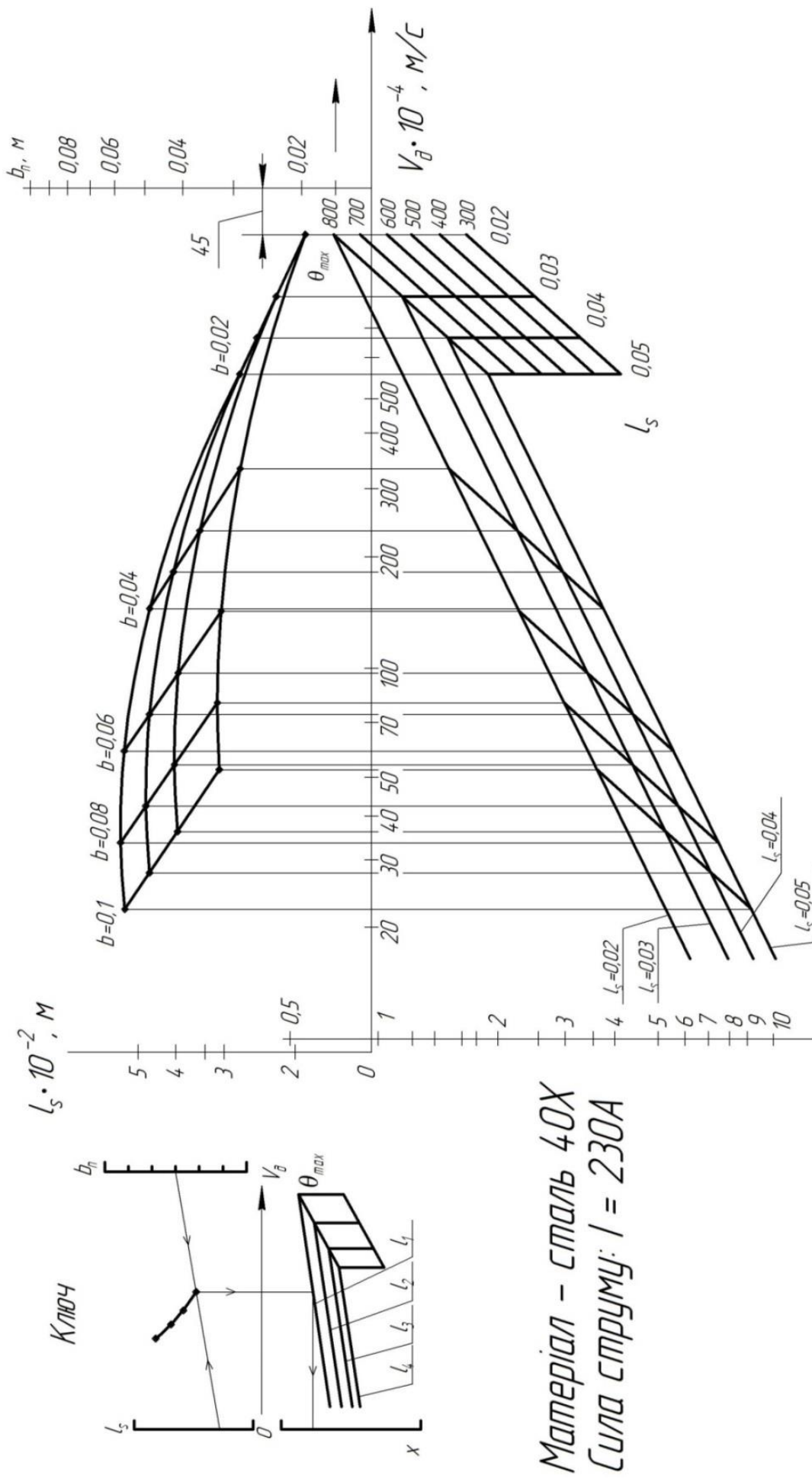


Рис. 5.4. Номограма для вибору раціональних параметрів нагрівання СПД

Температура початку мартенситного перетворення є лише одним з обмежень знизу для остигання припуску при ППДЗ. Для матеріалів з різним хімічним складом, фізико-механічними й теплофізичними властивостями це можуть бути різні параметри, що характеризують змінені властивості матеріалу припуску: глибина проникнення пластичної деформації й максимальних температур, створення раціональних структурно-фазових перетворень у нагрітому шарі, дисперсності структури.

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

До обмежень можна віднести такі граничні значення параметрів процесу ППДЗ, які пов'язані з технічними можливостями верстата, застосованого плазмового обладнання, що дозволяють забезпечити оптимальний термічний цикл.

У підсумку, щодо системи технічних обмежень, необхідно додати, що деякі технологічні умови можуть бути враховані різними способами. Граничні умови, що виходять зі спрощеного представлення експериментальних залежностей, які використовуються у моделі оптимізації, враховуються як правило, корекцією оптимізованих робочих режимів.

5.3. Розрахунок економічного ефекту від використання технології та обладнання поверхневого зміцнення великомодульних зубчастих коліс

Упровадження результатів науково-дослідної роботи підтверджені Актами (додатки Г, Д) та впроваджені на підприємствах: ТОВ «Бізнес – Трейд плюс» (від 18.04.2016 р.), АТ ««КОРУМ» КЗГО» (від 27.05.2016).

Ефективність застосування ППДЗ обумовлюється використанням обладнання та інструментів, а також експлуатаційними характеристиками.

Використання технології плазово-дугового зміцнення великомодульних вал-шестірень, які є елементами силових передач рудорозмельних млинів (МШЦ 4,5х6,0), дозволяє збільшити твердість поверхневого шару зубів до HRC 52 і тим самим підвищити абразивну зносостійкість в 2,28 рази, та довговічності роботи вказаних деталей на 33,7% (розрахунки наведені в додатку Б).

Розрахунок очікуваного річного економічного ефекту виконуємо згідно з «Методикою (основними положеннями) визначення економічної ефективності використання в народному господарстві нової техніки, рацпропозицій, винаходів» [138].

Вихідні данні:

1. Об'єм випуску вал-шестірень для умов виробництва ЦГЗК та ІнГЗК м. Кривого Рогу: $N = 16$ шт. в рік.

2. Гарантований час роботи деталі до відмови при базовому варіанті: $T_{\text{баз}} = 15130$ год.

3. Гарантований час роботи деталі до відмови в запропонованому варіанті: $T_{\text{нов}} = 20238$ год.

4. Річний час роботи рудорозмельного млина: $T_{\text{річ}} = 8700$ год.

5. Ціна вал-шестірні: $C = 390011,90$ грн.

6. Середній календарний час ремонту одного приводу рудорозмельного млина, пов'язаного з заміною вал-шестірні: $t_p = 60$ год/рем.

Розрахунок в цінах на 25.11.2017 р.

Витрати при ремонті зубчатої передачі.

$C_{\text{рем}}$ – середні звитрати на ремонт приводу рудорозмельного млина по базовому та запропонованому варіантам:

$$C_{\text{рем}} = C + (Z_p + H_p) \quad (5.11)$$

де Z_p – заробітна плата робочих, що виконують ремонт, грн.;

H_p – накладні витрати, грн.

$$C_{\text{рем}} = 390011,90 + (6930 + 1320) = 398261,9 \text{ грн.},$$

Кількість ремонтів в рік:

$$n_{\text{рем}} = T_{\text{річ}} / T_{\text{ср}} \quad (5.12)$$

За базовим варіантом: $n_{\text{рем}} = 8700 / 15130 = 0,58$.

За запропонованим: $n_{\text{рем}} = 8700 / 20238 = 0,43$.

Тоді загальні витрати на ремонт приводу рудорозмельного млина:

$$C = n_{\text{рем}} \cdot C_{\text{рем}} \quad (5.13)$$

$$C_{\text{баз}} = 0,58 \cdot 398261,9 = 230991,90 \text{ грн.}$$

$$C_{\text{нов}} = 0,43 \cdot 398261,9 = 171252,62 \text{ грн.}$$

Загальні додаткові витрати по новому варіанту, віднесені до однієї установки та операції ППДЗ складають 286605 грн (табл. 5.4)

Таблиця 5.4

Виробничі витрати на придбання обладнання для реалізації способу ППДЗ

№	Найменування обладнання та інструментів	Кількість, шт	Ціна, грн
1	Апарат плазмової різки АПР-402	1	146850
2	Верстат токарний 1А660 (балансова вартість)	1	120000
3	Плазмотрон ПВР-402М	1	6500
4	Сопла для плазмотронів	16	720
5	Перетворювач частоти VFD 007 EL43A	1	9335
6	Виготовлення магнітно-відхиляючої системи	1	3200
Разом $C_{\text{дод}}$			286605

Додаткові витрати на одну вал-шестірню складають:

$$C_{\text{дод}} = 286605 / 16 = 17912,81 \text{ грн}$$

Загальні додаткові витрати по новій технології:

$$C_{\text{дод. Н.}} = C_{\text{дод}} + Z_p + C_{\text{вир}}, \quad (5.14)$$

де Z_p – заробітна плата терміста ($T_{\text{осн}} = 71 \text{ хв.}$, $T_{\text{доп}} = 19 \text{ хв.}$), грн.;

$C_{\text{вир}}$ – витрати, пов'язані з кількістю використаної електроенергії, води, стиснутого повітря, що використовується для обробки за вказаним способом ППДЗ, грн.

$$C_{\text{дод. Н.}} = 17912,81 + 61,8 + 37800 = 55774,61 \text{ грн.}$$

Тоді $C_{\text{нов}} = 171252,62 + 55774,61 = 227027,23 \text{ грн.}$

Економія витрат під час ремонту одного приводу рудорозмельного млина:

$$E_{\Gamma} = E_p \cdot N, \quad (5.15)$$

де E_p – річна економія витрат на ремонт одного приводу рудорозмельного млина, грн:

$$E_p = C_{\text{баз}} - C_{\text{нов}} \quad (5.16)$$

$$E_p = 230991,9 - 227027,23 = 3964,67 \text{ грн.}$$

$$\text{Відповідно: } E_{\Gamma} = 3964,67 \cdot 16 = 63434,72 \text{ грн.}$$

Економічний ефект від скорочення простоїв рудорозмельних млинів при ремонті:

$$E_{\Pi} = Z_{36} \cdot N, \quad (5.17)$$

де Z_{36} – збитки від одного простою рудорозмельного млина, грн.:

$$Z_{36} = \Delta Z_{36} \cdot t_p \cdot n_{\text{рем}}, \quad (5.18)$$

де ΔZ_{36} – зменшення збитків через зменшення простоїв, грн.

Вартість простою рудорозмельного млина визначена департаментом по ремонту.

$$n_{\text{рем}} = n_{\text{рем баз}} - n_{\text{рем нов.}} = 0,58 - 0,43 = 0,15$$

Таким чином

$$Z_{36} = 1939 \cdot 60 \cdot 0,15 = 17451 \text{ грн,}$$

$$E_{\Pi} = 17451 \cdot 16 = 279216 \text{ грн.}$$

Економічний ефект від впровадження запропонованої технології за рік складе:

$$E_{\text{річ}} = E_{\Gamma} + E_{\Pi} \quad (5.19)$$

$$E_{\text{річ}} = 63434,72 + 279216 = 342650,72 \text{ грн.}$$

Термін окупності:

$$T = C_{\text{дод}} / E_{\text{річ}} = 286605 / 342650,72 = 0,83 \text{ року.}$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$E = 1 / T = 1 / 0,83 = 1,2.$$

Проведене обґрунтування економічного ефекту від впровадження технології ППДЗ у виробничий процес підтверджено довідкою розрахунку очікуваної економічної ефективності від використання результатів науково – дослідної роботи підприємством ТОВ «Ливарно-Виробнича Компанія «ПРОМГРУП» (додаток А).

Висновки до розділу 5

1. На основі сформульованих критеріїв, що висуваються до плазмового джерела нагрівання, створено комплекс обладнання для реалізації ППДЗ у виробничих умовах.

2. Обрані діапазони зміни робочих параметрів плазмового нагрівання, що забезпечують зміцнення на задану глибину без оплавлення поверхні.

3. Розрахунок економічного ефекту від використання технології підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих передач поверхневим плазмово-дуговим зміцненням:

- виробничі витрати на придбання обладнання для реалізації ППДЗ становлять – 286605 грн;
- річний економічний ефект дорівнює 342650,72 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 великомодульних зубчастих шестірень з урахуванням умов їх навантаження. Тому, підвищення зносостійкості відкритих великомодульних зубчастих передач рудорозмельних млинів, шляхом поверхневого плазмово-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 плазмово-дугового зміцнення робочих поверхонь зубів.

3 Дослідження властивостей сталей після поверхневої плазмово-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 плазмової обробки зразків, що заснована на обліку теплофізичних параметрів плазмового струменя.

4 Розглянуто особливості технології плазмового зміцнення поверхонь зубів великомодульних коліс та сформульовано критерії придатності плазмової дуги для поверхневого плазмово-дугового зміцнення: плазмова 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 плазмової дуги, що сканує за рахунок накладення на потік генерованої плазми зовнішнього магнітного поля. Реалізація даного методу була проведена при промислових випробовуваннях 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 плазмового зміцнення. В умовах ППДЗ ефективність плазмової 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 виявлено вплив параметрів режиму поверхневого плазово-дугового зміцнення (сили струму I та швидкості переміщення джерела нагрівання V_0) 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 плазовою 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.

8 Розроблено спосіб термічної обробки великомодульних зубчастих коліс, що включає нагрів бічної поверхні зуба без оплавлення плазовою 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 плазово-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., додаток Г), АТ ««КОРУМ» КЗГО» (від 27.05.2016 р., додаток Д), 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 (додаток А).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Нечаев В.П., Рязанцев А.А. Исследование, разработка, обоснование возможностей повышения надежности работы крупномодульных шестерен путем плазменного упрочнения их поверхностей – Міжнародний збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. – Донецьк. – 2012. – Вип. 1,2(43). – С. 227–232.
2. Гавриленко В.А. Зубчатые передачи в машиностроении. М.: Машгиз. 1962. – 532 с.
3. Голованов Н.Ф., Гинзбург Е.Г., Фирун Н.Б. Зубчатые и червячные передачи. Справочник. Л.:Машиностроение,1967. – 516 с.
4. Кораблев А.И., Решетов Д.Н. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач. М.: Машиностроение, 1968. – 288 с.
5. Кудрявцев В.Н. Зубчатые передачи. М.:Машгиз, 1957. – 250 с
6. Машнев М.М., Билинчук Н.Л., Эстлинг А.А. Методы повышения работоспособности и долговечности тяговых зубчатых, передач тепловозов. // Вестник машиностроения. – 1992. – № 3. – С. 32-35.
7. Орлов В.В, Повышение работоспособности тяговых зубчатых передач локомотивов. М.: МИИТ-ВлГУ, 2002. – 315 с.
8. Петрусевич А.И. Контактная прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1970. – 64 с.
9. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин.-Киев: Наукова думка, 1984. – 271 с.
10. Cold forming exhibits a hot chellende. «Metalwork. Prod.», 1972. N7. P. 113-115, 118-119.
11. Вулгаков Э.Б. Теория эвольвентных зубчатых передач. М.: Машиностроение, 1995. – 320 с.
12. Клепиков В.В. Пути повышения качества обработки цилиндрических зубчатых колес. СТИН, 1997. – №8. – С. 33-38.

13. Кораблев А.И., Решетов Д.Н. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач. М.: Машиностроение, 1968. – 288 с.
14. Лашнев С.И., Борисов А.Н. Геометрическая модель формирования поверхностей режущими инструментами. // СТИН, 1995. – № 4. – С 22-26.
15. Печеный В.И., Коротун С.А. Современные методы упрочнения зубьев зубчатых колес поверхностным пластическим: деформированием. Обзор. / Технология, экономика, организация производства и управления. М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1991. – 44с.
16. Производство зубчатых колес: Справочник / Под общ. ред. Б.А.Тайца., – 3-е изд., перераб. и допол. М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
17. Резников Н.А., Шатерин М.А., Кунин В.С., Резников Л.А. . Обработка металлов резанием с плазменным нагревом. М: Машиностроение, 1986. – 232 с.
18. Войнаровські Юзеф, Оніщенко В.П. Вплив зношування зубців на динамічні характеристики зубчастої передачі// Вибрації в техніке і технологіях, Всеукраїнський науково технічний журнал. - 2000. - №1, Вінниця: Вінницький державний аграрний університет. – С. 34-42.
19. Myga J.R. Wplyw zuzycia zeba na wielkosc sil dynamicznych. Praca doctorska, Politechnika Slaska, Gliwice, 1976.
20. Шведков Е.Л. и др. Словарь справочник по трению, износу и смазке деталей машин. - Киев: Наукова думка. 1979. - 188 с.
21. Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968. - 408с.
22. Black A.J., Kopalinsky E.M., Oxley P.L.B. An asperity deformation model for explaining the mechanisms involved in metallic sliding friction and A review. Vol 207. London: I Mech E. 1993. P. 335 - 352.
23. Eleod A. Numerical modeling of particle detachment // Absrtacts of Papers of The World Tribology Congress. Bath, UK: Bookcraft Limited. 199,7. P. 44.
24. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / Под ред. И.М. Федорченко. АН УССР. Ин-т проблем материаловедения. - 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Наук, думка, 1990. - 264 с.

25. Дроздов Ю.Н. Развитие трибологии для экстремальных условий // Трибология и надежность машин: Сб. науч. тр. / АН СССР, Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова; Отв. ред. В.С. Авдеевский, Ю.Н. Дроздов. – М.: Наука, 1990. – С. 5-18.

26. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высшая школа, 1991. – 320 с.

27. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 315 с.

28. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. – М.: Машиностроение, 1976. – 266 с.

29. Сорокин Г.М. О природе износостойкости стали при абразивном изнашивании // Вестник машиностроения. 1984. № 12. – С. 25 -27.

30. Сорокин Г.М. Прочность как основа механизма износостойкости сталей при абразивном изнашивании // Вестник машиностроения 1986. № 5. – С. 11-15.

31. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное; изнашивание. – М.: Машиностроение, 1990. – 220 с.

32. Буланже А.В., Палочкина Н.В., Фадеев В.З. Проектный расчет на прочность цилиндрических и конических зубчатых передач. – М.: Изд – во МГТУ, 1992. – 30 с.

33. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. – М.: Металлургия, 1983. – 360 с.

34. Орлов В.В., Юдин Д.Л., Петраков А.П., Корноухов А.П. О деформационном поверхностном упрочнении зубчатых колес // Вестник машиностроения. 1979. – №1. – С. 17-19.

35. Фадин Ю.А., Киреенко О.Ф. Определение износа узлов трения в процес се их эксплуатации // Вестник машиностроения. 2004. – № 3. – С. 27-32.

36. Алехин В.П., Шоршоров М.Х. Структурные особенности кинетики микропластической деформации вблизи свободной поверхности твердого тела // Физика и химия обработки материалов, 1974. – №4. – С. 107-121.

37. Захаров СМ. Контактно-усталостные повреждения колес грузовых вагонов / Под ред. СМ. Захарова. -М.: Интекст, 2004. -160 с.
38. Сорокин Г.М., Сафонов Б.П., Бегова А.В. Инженерные критерии выбора сталей по механическим свойствам для условий абразивного изнашивания // Вестник машиностроения. 2003. - № 7. - С. 35 - 37.
39. Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М.. Повышение надежности тяжелонагруженных зубчатых передач. - М.: Машиностроение, 1981. - 232 с.
40. Дроздов Ю.Н. Обобщенные характеристики для оценки износостойкости твердых тел. Трение и износ. Т. 1. 1990. - С. 417 - 424.
41. Справочник по триботехнике в 3-х т. под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 1989,1990,1992.
42. Шепеляковский К.З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. -М.: Машиностроение, 1972. - 287 с.
43. Крапошин В.С. Обработка поверхности металлических материалов лазерным излучением // Поверхность. 1982. № 3. - С. 1-12.
44. Кидин И.Н. Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов. -М.: Металлургия, 1969. - 375 с.
45. Рапопорт Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. - М.: Металлургия, 1993. - 277 с.
46. Индукционная закалка сталей: учебное пособие / Ю.Д. Корягин, В.И. Филатов. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. - 52 с.
47. Кобяков О С., Гинзбург Е.Г. Использование микроплазменного нагрева в процессе упрочняющей технологии// Автоматическая сварка. - 1975. - №5. - С. 66-67.
48. Rolf Roggen Durcissement Super ficial par Plasma des aciers au carbone des fontes// Rev. Metallurgie. - 1979,- У.16. №7. - Р. 532-537.
49. Эсибян Э.М. Плазменно-дуговая аппаратура, - Киев: Техника, 1971. -164 с.
50. Самотугин С.С., Пуйко А.В., Соляник Н.Х. и др. Эксплуатационные свойства инструментальных сталей после комплексного объемно- поверхностного упрочнения //Металловедение и термическая обработка металлов. - 1997. - №5. - С. 2-6.

51. Домбровский Ю.М., Бровер А.В. Экспериментальная установка для плазменного поверхностного упрочнения деталей машин. - М., 1996. -5 с. - Деп. в ВИНТИ, 22.11.96, №3387-В96.

52. Лесков Г.И. Источники нагрева при сварке // Сварка в СССР. - М.: Наука, 1981. - Т.2. - С.7-27.

53. Токмаков В.П., Гречнева М.В., Нестеренко Н.А. Энергетические характеристики процессов поверхностного упрочнения концентрированным источником энергии. - Киев. - 1988. - 10 с. Деп. в ВИНТИ, 26.04.88, №3207- В88.

54. Дубровская Е.А., Копецкий Ч.В., Крапошин В.С. и др. Выбор параметров лазерного нагрева углеродистых штейн для получения заданной глубины закалки //Металловедение и термическая обработка металлов. - 1986. - №9. - С.32-35.

55. Косырев Ф.К., Крапошин В.С. Использование известных теплофизических оценок для выбора параметров лазерной термообработки //Поверхность. - 1983. - №9. - С. 118-123.

56. Сахно В.Н., Огданский Н.Ф., Коршун В.И. Расчет температурных полей при воздействии локальных тепловых источников на поверхности детали //Физика и химия обработки материалов. - 1992. - №2. - С.49-54.

57. Пархоменко В.Д., Крыжановский М.В. Математическое моделирование процесса плазменной термической обработки углеродистой стали //Физика и химия обработки материалов. - 1989. - №4. - С.40-44.

58. Токмаков В.П., Петухов А.В. Математическое моделирование процессов плазменного поверхностного упрочнения //Тез. докл. конф. «Мат. методы и САПР в сварочном производстве», 30 янв.- 3 февр., 1990 / Произв. об-ние «Уралмаш», ин-т электросварки имени Е.О. Патона, Урал, политехн. ин-т - Свердловск, 1990 - С. 45.

59. Токмаков В.П., Петухов А.В. Компьютерное построение трехмерных диаграмм тепловых процессов при плазменном поверхностном упрочнении // Тез. докл. конф. «Мат. методы и САПР в сварочном производстве», 30 янв. - 3

февр., 1990 /Произв. об-ние «Уралмаш», ин-т электросварки имени Е.О. Патона, Урал, политехн. ин-т - Свердловск, 1990 - С. 44.

60. Поверхностное плазменное упрочнение деталей металлургического оборудования / Орос Н.В., Мецкович В.Б. //Тез. докл. Всес. научн.-техн. семинар «Восстановление и упрочнение деталей металлических агрегатов наплавкой, напылением и термообработкой», Москва, сент., 1990. - М, 1990. - С. 39-40.

61. Короткое В.А, Трошин О.В., Бердников А.А. Плазменная закалка сканируемой дугой без оплавления поверхности //Физика и химия обработки материалов. - 1995. - №2. - С. 101-106.

62. Установка для плазменно-дуговой термической обработки, управляемая с помощью компьютера / Zong Quanying, Li Chimxiong, Shen Shixi, Wang Hongfei, Tu Guofang //Hrianan ligong chxue xuebao. Ziran Kexwe ban - J. S. China Univ. Technol. Natur. Sei. - 1995. - 23, №10. - P. 75-81.

63. Теория столба электрической дуги / В.С. Энгельшт, В.Ц. Гурович Г. А. Десятков и др. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. - 376 с.

64. Донской А.В., Клубникин В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. - 221 с.

65. Исхакова Г.А., Рахимьянов Х.М. Исследование микроструктуры и механических свойств стали 45 после плазменного термоупрочнения // Электронная обработка материалов. -1987. - №5. - С. 24-27.

66. Поляков С.П., Ливитан Н.В., Бунина Ю.К. и др. Упрочняющая плазменно-дуговая обработка поверхности образцов белого чугуна // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1986. - №6. - С. 29-30.

67. Ставрев Д.С., Ников Н.Я. Упрочнение чугунов при поверхностном отбеле низкотемпературной плазмой //Металловедение и термическая обработка металлов. - 1985. - №4. - С. 15-18.

68. Структура и вязкость разрушения высокопрочного перлитно - цементитного чугуна после плазменной обработки /Самотугин С.С., Ковальчук

А.В., Соляник А.Х. и др. // Металловедение и термическая обработка металлов, - 1996. - №4. - С. 2-6.

69. Самотугин С.С., Кавальчук А.В., Новохацкая О.П. и др. Упрочнение инструмента из быстрорежущих сталей обработкой плазменной струей //Металловедение и термическая обработка металлов. - 1994. - №2. - С. 5-8.

70. Бердников А.А., Филипов М.А, Студенок Е.С. Структура закаленных углеродистых сталей после плазменного поверхностного нагрева //Металловедение и термическая обработка металлов. - 1997. - №6. - С. 2-4.

71. Коротков В.А., Бердников А.А., Толстов И.А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями. - Челябинск: Металл, 1993. -143 с.

72. Линник В.А.» Онегина А.К., Андреев А.И. и др. Поверхностное упрочнение сталей методом плазменной закалки //Металловедение и термическая обработка металлов. - 1983. - №4. - С.2-5.

73. Лещинский Л.К., Самотугин С.С, Пирч И.И., и др. Плазменное поверхностное упрочнение. - Киев: Техника, 1990, -109 с.

74. Лещинский Л.К., Самотугин С.С., Пирч И.И. и др. Влияние поверхностного упрочнения плазменной струей на характер разрушения углеродистых сталей // Физика и химия обработки металлов. - 1985. - ЖЗ. - С. 100 -106.

75. Плазменное поверхностное упрочнение сверл из стали Р6М5 / Пархоменко В.Д., Крыжановский М.В., Будюк Э.Д. и др. /Технология и организация производства. - 1989. - № 2. - С. 55-56.

76. Голубев В.С. Лазерно-плазменная обработка материалов //Весці АН БССР. Сер. физ.-техн. - 1989. - № 1. - С.67-71.

77. Углов А.А., Медрес Б.С, Соловьев А.А. О лазерно-плазменной обработке инструментальных сталей //Физика и химия обработки материалов. - 1988. - №4. -С. 79-83.

78. Пат. 2003731 С1 РФ, МКИ5 С23 С8/00, С23 С10/00, С21 С1/09. Способ поверхностного пламенного упрочнения «Плазмахим» / Домбровский Ю.М. (Россия). - №5061571/02; Заявл. 07.09.92; Оpubл. 30.11.93, Бюл. №43-44.

79. Шатерин М.А., Коротких М.Т., Нечаев В.П. Плазмотрон для плазменно-механической обработки. – «Сварочное производство», 1986, №8, - с.27, 28.

80. Нечаев В.П., Рязанцев А.А. Особенности тепловых процессов при обработке заготовок с плазменным нагревом. – Вісник Криворізького технічного університету. Збірник наукових праць. – Вип.26. Кривий Ріг, 2010. – с.157-160.

81. Ширшов И.Г., Котиков В.Н. Плазменная резка. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987, -192 с.

82. Пат. 103171 Україна, МПК С21D9/32. 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.

83. Богомолова Н.А. Практическая металлография. – М.: Высшая школа, 1978. -272 с.

84. Вишняков Я.Д. Современные методы исследования структуры деформированных металлов. – М.: Металлургия, 1975. - 480 с.

85. Металлография железа. В 3-х томах. Пер. с англ. Под ред. Ф.Н. Тавадзе – М.: Металлургия, 1972.

86. Арзамасов Б.Н. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1986, 384с.

87. Коротких М.Т. Высокопроизводительное плазменно-механическое фрезерование труднообрабатываемых материалов. – Дис. канд. техн. Наук. Л., 1984, 255с.

88. Ясь Д.С., Подмоков Б.Б., Дяденко Н.С. Испытание на трение и износ (методы и оборудование). – Киев: Техніка, 1971. – 138с.

89. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании.- М.: Машиностроение, 1966.- 321с.
90. Ямпольский Г.Я., Крагельский И.В. Исследование абразивного износа элементов пар трения качения. – М.: Наука, 1973.- 64с.
91. Леликов О.П., Нажесткин Б.П. Прогнозирование ресурса передаточных механизмов по критерию износа//Инженерный журнал. Справочник, 1999.-№5.-С. 24-31.
92. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин на прочность и надежность/ Под ред. П.М. Волкова, М.М. Тененбаума. – М.: Машиностроение, 1977.-310 с.
93. Тененбаум М.М. О видах, процессах и механизмах абразивного изнашивания/ Долговечность трущихся деталей машин: Сб. статей. Вып. 5/ Под общ. ред. Д.Н. Гаркунова.-М.: Машиностроение, 1990.-С. 202-215.
94. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970.-252 с.
95. Рещиков В.Ф. Трение и износ тяжело нагруженных передач.-М.: Машиностроение, 1975. – 232 с.
96. Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. –Л.: Машиностроение. Ленинград, отд-е, 1990. – 208 с.
97. Основы теории и расчета сельскохозяйственных машин на прочность и надежность/ Под ред. П.М. Волкова, М.М. Тененбаума.-М.: Машиностроение, 1977. –310 с.
98. Углов А.А. Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы //Материаловедение. – 1997. -№5. – С. 3–7.
99. Рыкалин Н.Н. Расчет тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.
100. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин. / Н.В. Спиридонов, О.С. Кобяков, И.Л. Куприянов; Под. ред. В.Н. Чачина. – Минск: Выш. шк., 1988. - С.80.

101. Transformation hardening of steel using high-energy electron beams / Elmer J. W., Newton M.A., Smith A.C. // Weld. J. – 1994. – 73, №12. – P. 291–299.
102. Карслоу Г, Егер Я. Теплопроводность твердых тел. – М.: Машгиз, 1964. – 487с.
103. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В, Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
104. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – С.65–73.
105. Кудряков О.В. Сравнительный анализ некоторых особенностей термоупрочнения углеродистых сталей // Термическая обработка стали (Теория, технология, техника эксперимента): Межвуз. сб. науч. тр./ ДГТУ; – Ростов-на-Дону. – 1994. – С.52 – 56.
106. Гречнева М.В., Токмаков В.П. Плазменное упрочнение металлов в жидких средах // Сварочное производство. – 1992. – №7. – С. 8–10.
107. Крапошин В.С. Зависимость глубины закалки сталей и чугунов от режима лазерного облучения //Физика и химия обработки материалов. – 1988. – №6. – С.88–96.
108. Головин Г.Ф., Замятнин М.М. Высокочастотная термическая обработка. – Л.: Машшюстроение. Ленингр. отд-ние, 1968. – С.34.
109. Лащенко Г.И. Плазменное упрочнение и напыление. – К.: «Екотехнологія», 2003. – 64 с.
110. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ.-М.: Машиностроение, 1977.-526 с.
111. Возников А.И., Бурдо Ю.И., Зинченко А.Я. и др. Об определении долговечности зубчатых передач горных машин. – Metallургическая и горнорудная промышленность. – 1971. – №2. – С. 73-74.
112. Ямпольский Г.Я., Натаров А.П. Расчет абразивного износа зубьев зубчатых передач. – В кн.: Расчетные методы оценки трения и износа.: Брянск. – 1975. – С. 186-204.

113. Любарский М.М. Повышение износоустойчивости тяжелонагруженных шестерен. – М.: Машиностроение, 1965. – 130 с.
114. Натаров А.П. Исследование влияния геометрических параметров зубчатых передач, работающих в средах с наличием абразива на их долговечность.: Автореф. Дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1978. – 236с.
115. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом/ под общ. ред. Резникова А.Н. – М.: Машиностроение, 1986. – 232с.
116. Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы/ под общ. ред. Рыкалина Н.Н. – М.: Наука, 1985. – 248с.
117. Резников А.Н. Теплообмен при резании и охлаждении инструментов. – М.: Машгиз, 1963. – 200с.
118. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279с.
119. Резников А.Н., Резников Л.А. Методика расчета параметров подогрева металла при плазменно-механическом резании. – НИИЭ Информэнергомаш. 9-81-01. – М., 1981. – 11с.
120. Чубаров Е.П. Управление системами с подвижными источниками воздействия. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 289с.
121. Исследование и разработка технологического процесса плазменно-механического торцового фрезерования заготовок применительно к деталям типа «коробки». Отчет/ Ленингр. политехн. ин-т. Руководитель темы В.Г. Подпоркин. - № 405207, Инв. №01.81.8035117. – Л., 1982. – 109с.
122. Хованский Г.С. Номография и ее возможности. – М.: Наука, 1977.
123. Гатовский К.М., Кархин В.А. Теория сварочных напряжений и деформаций. – Л., 1980. – 331с.
124. Дернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1974. – 199с.
125. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1966. 480с.
126. Арзамасов Б.Н. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1986. – 384с.

127. Шипачев В.С. Курс высшей математики. / В.С Шипачев.– М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981.– 280с.
128. Попов Ю.П. Вычислительный эксперимент / Ю.П. Попов, А.А. Самарский. – М.: Знание, 1983.– 64с.
129. Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум). Учебн. пособие / Бородюк В.П., Вошинин А.П. и др.; под ред. Круга Г.К. – М.: Высш. школа, 1983. – 216с.
130. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. / П.Г. Кацев.– М.: “Машиностроение”, 1974.– 213с.
131. Налимов В.В., Статистические методы планирования экстремальных экспериментов./ В.В. Налимов, Н.А. Чернова. М.: “Наука”, 1965.– 340с.
132. Налимов В.В. Теория эксперимента./ В.В. Налимов. М.: “Наука”, 1971.– 208с.
133. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий./ Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский . – М. : Наука, 1976.– 275с.
134. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. / В.В. Федоров.– М. : Наука, 1971.– 312 с.
135. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. / Н.И. Сидняев.– М.: Юрайт, 2012.–400с.
136. Головина Л.И. Линейная алгебра и некоторые её приложения. / Л.И.Головина. - М.: Наука, 1979. – 392 с.
137. Ефимов Н.В. Квадратичные формы и матрицы. / Н.В. Ефимов. – М.: Наука, 1967. – 160 с.
138. Семесенко М.П. Методы обработки и анализа измерений в научных исследованиях. / М.П. Семесенко. – М. : Наука, 1983. – 240с.
139. 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.

140. Ryazantsev A.A. Analysis of means of reliability and service life growth for open gear drive of ore-pulverizing mills / A.A. Ryazantsev // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 3. – P.16–22.

Додаток А



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Головний інженер

ТОВ «ДВК «ПРОМГРУП»

Рубаненко В.В.

2017 г.

ДОВІДКА РОЗРАХУНКУ ОЧІКУВАНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІД ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВО – ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ

За результатами науково – дослідної роботи Рязанцева Антона Олександровича, а саме «Підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих передач поверхневим плазмово-дуговим зміцненням», проведено розрахунок економічної ефективності впровадження технології плазмово-дугового зміцнення, що дозволяє підвищити абразивну зносостійкість в 2,28 рази, великомодульних вал-шестірень, які є елементами силових передач рудорозмельних млинів (МШЦ 4,5х6,0) та використовуються на ГЗК Кривого Рогу (ЦГЗК, ІнГЗК) базується на збільшенні довговічності роботи вказаних деталей на 33,7% і, тим самим, зменшенні витрат через простої обладнання, ремонти та кількості ремонтів.

Розрахунок економічного ефекту від використання технології підвищення зносостійкості великомодульних зубчастих передач поверхневим плазмово-дуговим зміцненням:

- виробничі витрати на придбання обладнання для реалізації ППДЗ становлять – 286605 грн;
- річний економічний ефект дорівнює 342650,72 грн;
- термін окупності проекту – 0,83 року;
- коефіцієнт економічної ефективності – 1,2.

Розрахунок виконали

К.т.н., доц. каф. ТМ, ДВНЗ «КНУ»

Старший викладач
каф. ТМ, ДВНЗ «КНУ»

Нечаєв В.П.

Рязанцев А.О.

Додаток Б

Розрахунки відкритих зубчастих передач рудорозмельних млинів на довговічність по зношуванню

Аналіз дійсної довговічності шестерень в умовах підприємств.

Розглянемо млин МШР-4500х6000 Центрального й Інгулецького ГЗК, м. Кривий Ріг. Активні поверхні зубів мають твердість HB 248...293 (прийmemo HB 280). Зуби всіх шестерень зношувалися однією робочою поверхнею. У таблиці Б.1 представлені строки служби перших шестерень, що вийшли з ладу в результаті зношування (дані за період 2011-2015 року).

Таблиця Б.1

Довговічність шестерень млинів

№ млина	Календарний строк служби, год	Час безперервної роботи (без обліку простоїв) T_{11} , год
Центральний ГЗК		
81	14136	12726
82	13200	11893
91	15096	14001
92	19680	17822
101	14760	13488
102	13632	11993
111	16464	15065
112	20664	18036
121	14832	13447
122	14376	13156
131	19224	16947
132	17928	16809
Інгулецький ГЗК		
111	20640	17819
113	21408	17208
121	17184	15910
123	17112	15558
131	19584	18027
133	13944	12437

З таблиці Б.1 бачимо, що в середньому $T_{11} = 15130$ ч. При експлуатації зношування зубів шестерень орієнтовно контролювалося за величині

зношування площадки зуба по окружності виступів. Товщина площадки виступів приблизно 15 мм. Надалі приймемо величину середнього зношування, що допускається $[\Delta S_1] = 10$ мм, припускаючи бракування шестерні при зменшенні товщини площадки на окружності виступів до величини, рівної $1,3 \cdot [\Delta S_1] = 1,3 \cdot 10 = 13$ мм.

Таблиця Б.2

**Вихідні дані для розрахунків довговічності відкритої зубчастої
передачі млина МШР-4000х5000**

№	Вихідні дані		Позначення	Чисельні значення
1	2		3	4
1	Число зубів	шестерня	z_1	33
		колесо	z_2	316
2	Модуль, мм		m	20
3	Кут нахилу зубів, гради.		β	6°
4	Передаточне число		u	9,576
5	Міжосьова відстань		a_w	3513,9
6	Діаметр вершин зубів, мм	шестерня	d_{a1}	712,78
		колесо	d_{a2}	6394,76
7	Діаметр основних окружностей, мм	шестерня	d_{b1}	623,22
		колесо	d_{b2}	5967,78
8	Кут зачеплення, гради.		d_w	20
9	Експериментальний параметр, що враховував абразивний вплив середовища й фізико - механічні властивості матеріалу, мм	шестерня	Φ_1	$3,4 \cdot 10^{-4}$
		колесо	Φ_2	$6,4 \cdot 10^{-4}$
10	Коефіцієнти, що враховують відмінність розрахункового випадку від експериментального	концентрації абразивних домішок	K_{qa}	1
		середнього радіуса абразивних часток	K_R	1
		межі міцності абразивних часток	K_σ	—
		характеристики пластичності поверхневих шарів	$\mu_{\delta 1}$	—
		твердості активних поверхонь зубів	μ_{HB1}	1,86
			μ_{HB2}	1
		умови навантаження	ξ	1

Закінчення таблиці Б.2

1	2		3	4
11	Частота обертання, об/хв	шестерня	n_1	150
		колесо	n_2	15,66
12	Припустима величина зношування зубів шестерні, мм		$[\Delta S_1]$	7 (10)*
13	Кількість припрацювальних режимів за термін служби шестерні		r_1	2 (1)*
14	Величина зношування зубів у припрацювальний період, мм	шестерня	ΔS_{10}	0,8
		колесо	ΔS_{20}	0,4
15	Швидкість припрацювального зношування і-ї шестерні		U_{ni1}	5 U_{1i}
16	Коефіцієнти, що характеризують підвищення швидкості зношування залежно від величини зношування зубів вінця		$k, \text{мм}^{-1}$	0,0177
			x	2,8
17	Число зачеплень зубів вінця за один оберт		v_2	1
18	Мінімально припустимий термін служби шестерні, год		T_{1min}	—
* При зношуванні зубів шестерні однією стороною				

Визначення початкової швидкості зношування зубів шестерні й вінця

Коефіцієнти, що характеризують крапки початку й кінця зачеплення

$$\chi_1 = 1 - \frac{\sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2}}{2a_w \sin \alpha_w} = 1 - \frac{\sqrt{6394,76^2 - 5967,78^2}}{2 \cdot 3513,9 \cdot 0,342} = 0,0441$$

Геометричні коефіцієнти зношування, що характеризують розподіл зношування по профілю зуба

$$y_{H1} = \sqrt{\chi_{1(2)}(1 - \chi_{1(2)})} \frac{|\chi_{1(2)} - (1 - \chi_{1(2)})u|}{\chi_{1(2)} + (1 - \chi_{1(2)})u} \cdot \frac{1}{\chi_{1(2)}} \quad (\text{Б.1})$$

$$y_{H1} = \sqrt{0,0441(1 - 0,0441)} \frac{|0,0441 - (1 - 0,0441) \cdot 9,576|}{0,0441 + (1 - 0,0441) \cdot 9,576} \cdot \frac{1}{0,0441} = 4,61$$

$$y_{H2} = \sqrt{0,1439(1 - 0,1439)} \frac{|0,1439 - (1 - 0,1439) \cdot 9,576|}{0,1439 + (1 - 0,1439) \cdot 9,576} \cdot \frac{1}{0,1439} = 2,355$$

Усереднена величина геометричного коефіцієнта

$$\overline{y_H} = \frac{y_{H1} \left(\frac{1}{u+1} - \chi_1 \right) + y_{H2} \left(\chi_2 - \frac{1}{u+1} \right)}{2(\chi_2 - \chi_1)} \quad (\text{Б.2})$$

$$\overline{y_H} = \frac{4,61 \left(\frac{1}{9,576+1} - 0,0441 \right) + 2,355 \left(0,1439 - \frac{1}{9,576+1} \right)}{2(\chi_2 - \chi_1)} = 1,747$$

Усереднена величина коефіцієнта, що враховує геометрію зачеплення

$$K = \left[\frac{2m(z_1 - z_2) \sin \alpha_w}{\cos \beta} \right] \cdot \overline{y_H} \quad (\text{Б.3})$$

$$K = \left[\frac{2 \cdot 20 \cdot (z_{33} - 316) \cdot 0,342}{0,9945} \right] \cdot 1,747 = 121 \text{ мм}$$

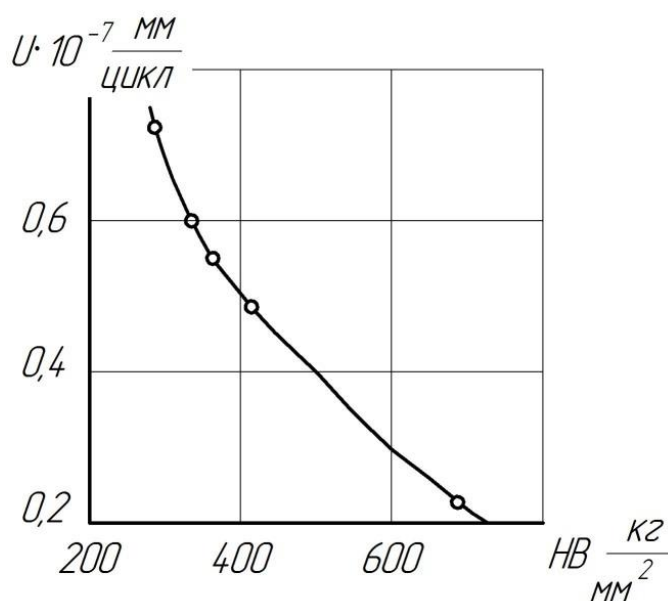


Рис. Б.1. Залежність швидкості зношування зубів шестерні від твердості їх активних поверхонь (сталь 40X, млин МШР-4000х5000, ІнГЗК)

У зв'язку з відсутністю даних про величини σ , q , t для визначення L_1 скористаємося і графіком, представленим на рис. Б.1. При $HB_{1P} = 520$ (HRC 52) – розрахункове значення твердості, яке ми можемо досягти шляхом плазмового зміцнення робочих поверхонь шестерень, $U_{HB1E} = 0,375 \cdot 10^{-7}$ (мм/цикл), при HB_{1E}

= 280 – фактична твердість робочих поверхонь шестерень (в умовах ГЗК м. Кривий Ріг), $U_{HB1P} = 0,53 \cdot 10^{-7}$ (мм/цикл). Тоді

$$L_1 = \frac{\xi}{K_{q_a}^{2/3} K_R^{0,5}} \cdot \frac{U_{HB1P}}{U_{HB1g}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{0,375 \cdot 10^{-7}}{0,53 \cdot 10^{-7}} = 0,5$$

Відсутність даних не дозволяє визначити L_2 . Однак, відомо, що $L_2 < 1$. В подальшому приймемо $L_2 = 1$, що приведе до занижених розрахункових значень довговічності.

Початкова швидкість зношування зубів шестерні й вінця

$$U_{1(2)0} = 60 \Phi_{1(2)} L_{1(2)} K n_{1(2)} \quad (\text{Б.4})$$

$$U_{10} = 60 \cdot 3,4 \cdot 10^{-10} \cdot 0,5 \cdot 121 \cdot 150 = 0,185 \cdot 10^{-3}, \text{ мм/год,}$$

$$U_{20} = 60 \cdot 6,4 \cdot 10^{-10} \cdot 1 \cdot 121 \cdot 15,66 = 0,728 \cdot 10^{-4}, \text{ мм/год.}$$

Довговічність зубчастої передачі при раціональних режимах експлуатації

Зношування зубів з кожної робочої поверхні по 3,5 мм.

Величина зношування зубів вінця за строк служби i - ї шестерні визначається:

$$\begin{aligned} \Delta S_{2i} &= v_1 \cdot r_i \cdot \Delta S_{20} + \frac{U_{20}}{U_{10}} \{ [\Delta S_1] - r_i \cdot \Delta S_{10} \} = \\ &= 1 \cdot 2 \cdot 0,4 + \frac{0,728 \cdot 10^{-4}}{0,185 \cdot 10^{-3}} \{ 7 - 2 \cdot 0,8 \} = 2,9 \text{ мм} \end{aligned}$$

Середня швидкість зношування зубів шестерні й вінця при роботі i - ї шестерні визначається:

$$\begin{aligned} U_{1(2)i_{cp}} &= U_{1(2)0} \left\{ 1 + \frac{k}{x+1} \cdot \Delta S_{2i}^x [i^{x+1} - (i-1)^{x+1}] \right\} = \\ &U_{1(2)0} \left\{ 1 + \frac{0,0177}{2,8+1} \cdot 2,9^{2,8} [i^{2,8+1} - (i-1)^{2,8+1}] \right\} \cdot \end{aligned}$$

Для $i = 1, 2, 3, 4$

$$U_{1(2)1_{порівн}} = 1,09 U_{1(2)0};$$

$$U_{1(2)2_{порівн}} = 2,19 U_{1(2)0};$$

$$U_{1(2)3_{порівн}} = 5,69 U_{1(2)0};$$

$$U_{1(2)4_{порівн}} = 12,84 U_{1(2)0}.$$

Терміни служби шестерень за термін служби вінця визначаються по формулі 4.7

$$T_{11} = \frac{7 - 2 \cdot 0,8}{1,09 \cdot 0,185 \cdot 10^{-3}} + \frac{2 \cdot 0,8}{5 \cdot 1,09 \cdot 0,185 \cdot 10^{-3}} = 28365 \text{ ч},$$

$$T_{12} = \frac{7 - 2 \cdot 0,8}{2,19 \cdot 0,185 \cdot 10^{-3}} + \frac{2 \cdot 0,8}{5 \cdot 2,19 \cdot 0,185 \cdot 10^{-3}} = 14118 \text{ ч},$$

$$T_{13} = \frac{7 - 2 \cdot 0,8}{5,69 \cdot 0,185 \cdot 10^{-3}} + \frac{2 \cdot 0,8}{5 \cdot 5,69 \cdot 0,185 \cdot 10^{-3}} = 5434 \text{ ч}.$$

Потім вінець розвертаємо для роботи зубів іншою стороною, тоді $T_{14} = T_{11} = 28365$ год, $T_{15} = T_{12} = 14118$ год, $T_{16} = T_{13} = 5434$ год.

Довговічність зубчастого вінця:

$$T_2 = \Sigma T_{1i} = 2 \cdot (28365 + 14118 + 5434) = 95834 \text{ ч}.$$

Довговічність першої шестерні для умов експлуатації, коли зуби шестерні зношуються однієї стороною, зуби вінця – двома сторонами

Величина зношування зубів вінця за строк служби першої шестерні ($i = 1$) в I і II етапах зношування

$$\Delta S_{2i}^I = v_2 r_2 \Delta S_{20} + \frac{U_{20}}{U_{10}} \{ [\Delta S_1^I] - r_i^I \Delta S_{10} \} = 1 \cdot 1 \cdot 0,4 + \frac{0,728 \cdot 10^{-4}}{0,185 \cdot 10^{-3}} \{ 3,5 - 1 \cdot 0,8 \} = 1,46 \text{ мм},$$

$$\Delta S_{2i}^{II} = \frac{U_{20}}{U_{10}} \{ [\Delta S_1^{II}] - [\Delta S_1^I] \} = \frac{0,728 \cdot 10^{-4}}{0,185 \cdot 10^{-3}} \{ 10 - 3,5 \} = 2,56 \text{ мм}.$$

Величини зношування зубів вінця на початку і наприкінці I і II етапів зношування шестерень ($i = 1$)

$$\Delta S_{21}^{I'} = 0; \quad \Delta S_{21}^{II'} = 1,46 \text{ мм};$$

$$\Delta S_{21}^{I''} = \Delta S_{21}^{II'} = 1,46 \text{ мм}; \quad \Delta S_{21}^{II''} = 1,46 + 2,56 = 4,02 \text{ мм}.$$

Середня швидкість зношування зубів в I і II етапах зношування шестерні ($i = 1$)

$$U_{1(2)1cp}^I = U_{1(2)0} \left[1 + \frac{K}{x+1} \cdot \frac{\Delta S_{21}^{II^{I^{x+1}}} - \Delta S_{2i}^{I^{I^{x+1}}}}{\Delta S_{21}^{II^I} - \Delta S_{2i}^{I^I}} \right],$$

$$U_{1(2)i_{cp}}^I = U_{1(2)0} = 0,185 \cdot 10^{-3},$$

$$U_{1(2)1cp}^{II} = a U_{1(2)0} \left[1 + \frac{K}{x+1} \cdot \frac{\Delta S_{21}^{II^{I^{x+1}}} - \Delta S_{2i}^{I^{I^{x+1}}}}{\Delta S_{21}^{II^I} - \Delta S_{2i}^{I^I}} \right] =$$

$$= a U_{1(2)0} \left[1 + \frac{0,0177}{2,8+1} \cdot \frac{4,02^{3,8} - 1,46^{3,8}}{4,02^{3,8} - 1,46^{3,8}} \right] = a U_{1(2)0} \cdot 1,35,$$

$$a = 1 + \frac{K}{x+1} \cdot \frac{[\Delta S_1^{II}]^{x+1} - [\Delta S_1^I]^{x+1}}{[\Delta S_1^{II}] - [\Delta S_1^I]} = 1 + \frac{0,0177}{2,8+1} \cdot \frac{10^{3,8} - 3,5^{3,8}}{10 - 3,5} = 5,44.$$

$$\text{Тоді } U_{1(2)1cp}^{II} = 1,35 \cdot 5,44 \cdot 0,185 \cdot 10^{-3} = 1,36 \cdot 10^{-3}.$$

Довговічність першої шестерні

$$T_{11}^I = \frac{[\Delta S_1^I] - r_1^I \Delta S_{10}}{U_{11cp}^I} + \frac{r_1^I \Delta S_{10}}{U_{21}} = \frac{3,5 - 1 \cdot 0,8}{0,185 \cdot 10^{-3}} + \frac{1 \cdot 0,8}{5 \cdot 0,185 \cdot 10^{-3}} = 15459 \text{ ч.}$$

$$T_{11}^{II} = \frac{[\Delta S_1^{II}] - [\Delta S_1^I]}{U_{11cp}^{II}} = \frac{10 - 3,5}{1,83 \cdot 10^{-3}} = 4779 \text{ ч.}$$

$$T_{11} = T_{11}^I + T_{11}^{II} = 15459 + 4779 = 20238 \text{ ч.}$$

У підсумку, з результатів розрахунків видно, що при збільшенні твердості робочих поверхонь зубчастих коліс (з HB 280 до HRC 52) зростає довговічність шестерні. Довговічність розглянутих шестерень у процесі експлуатації становить у середньому $T_{11} = 15130$ год, у результаті розрахунків довговічність збільшується до $T_{11} = 20238$ год. У такий спосіб зі збільшенням твердості поверхневого шару зубів до HRC 52 ми можемо підвищити довговічність роботи шестерні на 33,7%.

Додаток В

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель технического департамента –
главный инженер ЧАО «КЗГО»

С.В.Кравченко

«27» октября 2013 г.



АКТ

производственного испытания процесса поверхностной плазменной заковки

23.07.2013 г.

г. Кривой Рог
ЧАО «КЗГО»

МСЦ № 1

Состав комиссии:

от ЧАО «КЗГО»:

Главный сварщик
Начальник МСЦ №1
Ведущий инженер-технолог

Чикачков Д.В.
Минин М.А.
Герус С.В.

от ГВУЗ «КНУ»:

К.т.н., доц. каф. ТМ
Ассистент каф. ТМ

Нечаев В.П.
Рязанцев А.А.

Оборудование:

токарно-карусельный станок мод. 1540
установкой плазменной резки типа АПР-401

Обрабатываемая деталь:

вал-шестерня, черт. П1747.01

Марка материала:

40Х

Инструмент:

плазматрон воздушной резки, типа ППН-1М;
электромагнитная сканирующая система

Настоящий акт составлен в том, что в цехе МСЦ-1 (корпус 2) произведено промышленное испытание процесса поверхностной плазменной заковки, разработанного совместно с ГВУЗ «Криворожский национальный университет», заготовок валов-шестерен на токарно-карусельном станке модели 1540, оснащенном установкой плазменной резки типа АПР-401, системами вентиляции, подвода воды и плазмообразующего газа (воздуха), а также манипулятором и специальным плазмотроном.

Параметры используемого оборудования и достигнутые технологические режимы сведены в таблице.

В качестве источника нагрева применялся плазматрон воздушной резки, типа ППН-1М, оснащенный электромагнитной сканирующей системой, разработанной на кафедре технологии машиностроения ГВУЗ «Криворожский национальный университет».

Испытания выполнялись в соответствии с планом работ п. 1.7 договора №20 от 08.07.2009 г. о сотрудничестве между ЧАО «КЗГО» и Университетом.

Все работы при выполнении промышленного испытания данного процесса проводились в соответствии с ИОТ 16-11; 27-11; 1 по технике безопасности.

Параметры используемого оборудования и технологические режимы обработки

№ образца	Марка материала	Размер заготовки $h \times b \times l$, мм	Скорость передвижения заготовки V , м/мин	Частота вращения планшайбы n , об/мин	Величина тока плазменной дуги I , А	Напряжение U , В	Твердость (по Роквеллу)
1	40X	24×55×130	3,1	0,26	150	150	3-8
2	40X		0,98		150	140	10-17
3	40X		2,29		150	150	3-10
4	40X		0,98		200	150	40-44
5	40X		0,57		150	150	45-57
6	45Г		3,1		150	150	3-9
7	45Г		2,61		150	150	3-10
8	45Г		2,61		150	150	3-8
9	45Г		2,29		150	150	3-9
10	45Г		0,57		200	180	0
11	40X		0,57		200	150	45-50

Выводы комиссии:

В результате выполнения промышленных испытаний процесса поверхностной плазменной закалки установлены технологические режимы, позволяющие обеспечить закалку поверхностного слоя на глубину 1,5-4мм с обеспечением твердости до 57HRC.

Состав комиссии:

от ЧАО «КЗГО»:

Главный сварщик

Чикачков Д.В.

Начальник МСЦ №1

Минин М.А.

Ведущий инженер-технолог

Герус С.В.

от ГВУЗ «КНУ»:

К.т.н., доц. каф. ТМ

Нечаев В.П.

Ассистент каф. ТМ

Рязанцев А.А.

Додаток Г

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Бізнес – Трейд плюс»

Слинько Е.В.



«*16*» *вересня* 20*16*

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВО – ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ

Цим актом підтверджуємо, що результати роботи Рязанцева Антона Олександровича, а саме «Метод поверхневого плазмового зміцнення зубів крупномодульних зубчатих передач», **впроваджені** в процесах виготовлення та термічної обробки деталей гірничих машин, що здійснюються ТОВ «Бізнес – Трейд плюс».

Пропонований метод поверхневого плазмового зміцнення зубів крупномодульних зубчатих передач впроваджено для **рішення наступних задач**:

- обґрунтування параметрів технічного обслуговування та зниження його вартості за рахунок підвищення строку служби за рахунок плазмового зміцнення поверхонь зубів;

- зниження до мінімуму простоїв обладнання та технологічних систем;
- попередження аварійних станів та виходу з ладу обладнання;
- виключення витрат на аварійно-відновлювальні роботи.

За рахунок чого досягнуто:

- зміцнюється тільки поверхневий шар, а серцевина залишається в'язка, що забезпечує підвищення опору одночасно зношуванню та втоми;

- відсутність або мінімальні деформації зміцнених деталей, що дозволяє підвищити точність їх виготовлення, знизити трудомісткість механічної обробки й витрати на виготовлення;

- при зміцненні без оплавлення, що досягається застосуванням серійного плазмотрону повітряної різки, типу ППН-1М, який оснащено електромагнітною скануючою системою, що була розроблена на кафедрі технології машинобудування ДВНЗ «КНУ», поверхні не потрібно наступна механічна обробка, що дозволяє використовувати її як фінішну операцію технологічного процесу;

- наявність у поверхневому шарі стискаючих напруг і присутність залишкового аустеніту підвищують опірність зародженню й поширенню тріщин;

- високий ефективний ККД нагрівання плазмовою дугою (до 40 %).

Головний інженер
ТОВ «Бізнес – Трейд плюс»



(*Слинько Е.В.*)

Додаток Д

УТВЕРЖДАЮ:

и.о. Главный инженер – руководитель
технического департамента АО «КОРУМ
Криворожский завод горного оборудования»

Минчин И.А.

2016 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

27.05. 2016 г.

г. Кривой Рог

АО «КОРУМ Криворожский завод горного оборудования»

МСЦ № 1

Состав комиссии:

**от Частного акционерного общества
«Криворожский завод горного оборудования»:**

**от ГВУЗ «Криворожский
национальный университет»:**

Главный сварщик
Начальник МСЦ №1

Чикачков Д.В.
Бурдюк А.А.

К.т.н., доц. каф. ТМ
Ассистент каф. ТМ

Нечаев В.П.
Рязанцев А.А.

Специалист по техническому
сопровождению механи-
ческого производства

Мамай С.В.

Оборудование:

токарно-карусельный станок мод. 1540
установкой плазменной резки типа АПР-401
вал-шестерня, черт. П1747.01

Обрабатываемая деталь:

40Х

Марка материала:

Инструмент:

плазмотрон воздушной резки, типа ППН-1М;
электромагнитная сканирующая система

Мы, нижеподписавшиеся представители ГВУЗ «Криворожский национальный университет», к.т.н., доц. каф. технологии машиностроения Нечаев В.П., ассистент каф. технологии машиностроения Рязанцев А.А., и Акционерного общества «КОРУМ Криворожский завод горного оборудования», главный сварщик Чикачков Д.В., начальник МСЦ №1 Бурдюк А.А., Специалист по техническому сопровождению механического производства Мамай С.В. составили Акт о том, что результаты производственных испытаний проведенных на Акционерном обществе «КОРУМ Криворожский завод горного оборудования» и научные исследования по теме диссертационной работы А.А. Рязанцева «Исследование, разработка, обоснование возможностей повышения надежности работы деталей горных машин путем плазменного упрочнения их поверхностей» возможно использовать в технологическом процессе.

Параметры используемого оборудования и достигнутые технологические режимы сведены в таблице.

Марка материала	Скорость передвижения заготовки V, м/мин	Величина тока плазменной дуги I, А	Толщина закаленного слоя, мм	Напряжение U, В	Твердость (по Роквелл)
40X	0,98	200	1,5 – 4	150	40-44
40X	0,57	150		150	45-57
40X	0,57	200		150	45-50

В качестве источника нагрева применялся плазмотрон воздушной резки, типа ППН-1М, оснащенный электромагнитной сканирующей системой, разработанной на кафедре технологии машиностроения ГВУЗ «Криворожский национальный университет».

Параметры используемого оборудования и технологические режимы обработки позволили на испытуемых деталях обеспечить следующие факторы:

а. упрочняется только поверхностный слой, а сердцевина остается вязкой, что обеспечивает повышенное сопротивление одновременно изнашиванию и усталости;

б. отсутствие или минимальные деформации упрочняемых деталей, что позволяет повысить точность их изготовления, снизить трудоёмкость механической обработки и затраты на изготовление;

в. при закалке без оплавления поверхности не требуется последующая механическая обработка, что позволяет использовать ее в качестве финишной операции технологического процесса;

г. наличие в поверхностном слое сжимающих напряжений и присутствие остаточного аустенита повышают сопротивляемость зарождению и распространению трещин;

д. высокий эффективный КПД нагрева плазменной дугой (до 40 %).

При подготовке и составлении данного акта учитывалось теоретическое обоснование параметров процесса, выполненное в диссертационной работе Рязанцева А.А., а именно – особенности микроструктуры и физико-механических свойств упрочненного слоя плазменной обработкой в сравнении с другими видами поверхностной закалки; влияние скорости охлаждения после нагрева быстро движущейся сканирующей плазменной дугой на структурные превращения в поверхностном слое зубчатого колеса; анализ качества и напряженного состояния рабочей поверхности зуба после плазменного нагрева.

Выводы комиссии: данная научно-техническая разработка обладает рядом технологических преимуществ подтвержденных актом производственного испытания (акт производственного испытания процесса поверхностной плазменной закалки утвержденный 27.12.2013), и может быть испытана для внедрения в производство валов-шестерен (черт. П1747.01).

Состав комиссии:

от АО «КОРУМ Криворожский завод
горного оборудования»:

Главный сварщик

Начальник МСЦ №1

Специалист по техническому сопровождению
механического производства

от ГВУЗ «КНУ»:

К.т.н., доц. каф. ТМ

Ассистент каф. ТМ

Чикачков Д.В.

Бурдюк А.А.

Мамай С.В.

Нечаев В.П.

Рязанцев А.А.

Додаток Е

Затверджую

Перший проректор

ДВНЗ «Криворізький
національний університет»

Вербицький В.І.



08 20 17 р.

АКТ

**впровадження в навчальний процес результатів
дисертаційних досліджень Рязанцева А.О. за темою
«Розробка технології підвищення довговічності елементів силових передач
рудорозмельних млинів»**

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи асистента Рязанцева А.О. за темою «Розробка технології підвищення довговічності елементів силових передач рудорозмельних млинів» отримали використання у навчальному процесі при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальностями «Металорізальні верстати та системи», «Прикладна механіка», «Інженерна механіка», «Технології машинобудування» наступним чином:

1. Підготовлені конспекти лекцій та методичні вказівки за дисциплінами «Теорія різання», «Електрофізична та електрохімічна обробка»;

2. Підготовлено та захищено випускні роботи магістрів з відповідними темами наукових робіт:

- Лютий М.І. «Обґрунтування методики температурних досліджень при плазмовому загартуванні зубчастих коліс» (2015 р.);
- Редькін І.А. «Поверхнєве зміцнення деталей плазмовим загартуванням» (2015 р.).

3. Підготовлено та подано роботу студентки Осипи А.Р. «Плазменное упрочнение нагруженных поверхностей деталей» на конкурс стипендіальної програми «Завтра.UA» (2016 р.).

Декан механіко-машинобудівного
факультету, к.т.н., доцент

С.С. Дубровський

Додаток Ж

B27

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ"
 (УКРПАТЕНТ)

вул. Глазунова, 1, м. Київ-42, 01601, Україна Тел.: (044) 494-05-05 Факс: (044) 494-05-06
 E-mail: office@ukrpatent.org

26.09.2016 № 19350/ЗУ/16

На Ваш лист від 22.06.2016 № 6/н
 Стосується заявки № у 2015 04396
 / при листуванні просимо посилатися на цей № /

Адреса для листування
 Криворізький національний
 університет, патентний відділ, вул.
 Пушкіна, 44, м. Кривий Ріг, 50002

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор з питань експертизи ДП
 "Український інститут інтелектуальної
 власності"



Н.І. Петрова

Висновок експертизи щодо умов патентоздатності

(11) Номер деклараційного патенту 103171

(21) Реєстраційний номер заявки у 2015 04396

(22) Дата подання 05.05.2015

(54) Назва корисної моделі

СПОСІБ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

Державне підприємство "Український інститут інтелектуальної власності", як уповноважений заклад експертизи, відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі" (далі - Закон) та встановлених на його основі Правил розгляду заявки на винахід та заявки на корисну модель, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України, від 05.03.2002 №197 (далі - Правила розгляду), провело експертизу запатентованої корисної моделі на відповідність умовам патентоздатності (далі - експертиза).

Експертиза проведена за клопотанням Криворізького національного університету, поданим до Державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності» 22.06.2016 р. відповідно до частини другої статті 33 Закону.

Експертиза проведена відповідно вимог п. 9.3 Правил розгляду в обсязі опублікованих формули і опису до патенту України на корисну модель № 103171 із врахуванням Правил складання і подання заявки на винахід та заявки на корисну модель, які затверджені наказом Міністерства освіти і науки України від 22.01.2001 р. № 22 (далі – Правила складання).

1. Рівень техніки.

Рівень техніки визначено за результатами патентного пошуку, проведеного Державним підприємством «Український інститут інтелектуальної власності» відповідно до п. 6.3 Правил розгляду.

Рівень техніки характеризується зазначеними нижче документами, що стосуються предмету пошуку (запатентованої корисної моделі), визначеними згідно вимогам п. 6.5.2.1 Правил розгляду:

u201504396

2

Нечаев В. П., Рязанцев А. А. Модификация свойств поверхностных слоев тяжело нагруженных деталей горных машин посредством плазменного упрочнения // Вісник Криворізького національного університету. - № 32. - 2012. С. 123 – 127 (далі – D1);

Нечаев В. П., Рязанцев А. А. Особенности тепловых процессов при обработке заготовок с плазменным нагревом // Вісник Криворізького національного університету. - № 26. - 2010 (далі – D2).

Калашников А. С. Технология изготовления зубчатых колес. – М.: Машиностроение. – 2004. – С. 140 – 155;

Нечаев В. П., Рязанцев А. А. Исследование, разработка, обоснование возможностей повышения надежности работы крупномодульных шестерен путем плазменного упрочнения их поверхностей // Прогресивні технології і системи машинобудування. – Випуск 1, 2 (43). – 2012. – С. 227 – 232;

Нечаев В. П., Рязанцев А. О. Критерії вибору джерела нагріву для умов поверхневої плазмової обробки // Вісник Криворізького національного університету. - № 29. - 2011;

UA 74973 C2, 15.02.2006;

RU 2121514 C1, 10.11.1998;

RU 2430166 C1, 27.09.2011;

GB 1541438 A, 28.02.1979;

JP 62243712 A, 24.10.1987;

JP 62199716 A, 03.09.1987;

CN 103409599 A, 27.11.2013.

2. Перевірка формули корисної моделі із врахуванням опису корисної моделі на відповідність вимогам чч. 4, 7, 8 ст. 12 Закону відповідно до п. 6.4 Правил розгляду.

2.1. У формулі запатентованої корисної моделі, що підлягає перевірці щодо умов патентоздатності відповідно до частини другої статті 33 Закону, заявлено:

«Спосіб термічної обробки крупномодульних зубчастих коліс, що включає нагрівання без оплавлення плазмовою дугою бічної поверхні зуба із заданою силою струму, переміщення дуги вздовж поздовжньої осі зубчастого колеса, який відрізняється тим, що нагрівання здійснюють дугою, спрямованою фронтально до середини робочої частини профілю зуба під кутом $70^\circ \dots 90^\circ$ і коливної, відносно свого середнього положення, із частотою зовнішнього змінного електромагнітного поля поперек поздовжньої лінії зубів, з амплітудою, що дорівнює $0,7-0,8$ висоти зуба, при цьому переміщення дуги проводять поступально від одного торця зубчастого колеса до іншого зі швидкістю, що перевищує швидкість поширення температури в даному 25 матеріалі:

$$S_M = \left(\frac{437 IU \eta_t \sqrt{\omega}}{\Theta_n \lambda B} \right)^2,$$

де – S_M швидкість переміщення дуги щодо заготовки, мм/хв.;

I, U – струм і напруга плазмової дуги;

η_t – тепловий ККД плазмової дуги;

Θ_n – температура аустенітного перетворення матеріалу деталі;

$\lambda, \text{Вт/см}^\circ\text{C}$ і $\omega, \text{см}^2/\text{с}$ – коефіцієнти тепло- і температуропровідності оброблюваного матеріалу відповідно;

B – ширина зони нагрівання (амплітуда сканування плазмової дуги), мм».

При цьому, при перевірці формули запатентованої корисної моделі на відповідність умовам п. 6.4 Правил розгляду встановили, що вона містить технічну помилку, зокрема у математичній формулі тепловий ККД плазмової дуги зазначено як η_t , однак в подальшому цей ККД позначено як η_T .

2.2. Відповідно до чч. 4, 7, 8 ст. 12 Закону: вимоги до складання заявки на корисну модель дотримані, зокрема:

Заявка на корисну модель стосується однієї корисної моделі (вимога єдиності корисної моделі умова ч. 4 ст. 12 Закону).

u201504396

3

Опис корисної моделі викладено у визначеному порядку і суть корисної моделі розкрита настільки ясно і повно, щоб її зможе здійснити фахівець у зазначеній галузі (умова ч. 7 ст. 12 Закону).

Формула запатентованої корисної моделі виражає її суть, базується на описі і викладена у визначеному порядку ясно і стисло (умова ч. 8 ст. 12 Закону).

3. Перевірка промислової придатності запатентованої корисної моделі згідно з ч. 8 ст. 7 Закону та відповідно до п. 6.5.1 Правил розгляду.

Згідно із п. 6.5.1.1 Правил розгляду:

«Для встановлення промислової придатності винаходу перевіряють:

(а) наявність у матеріалах заявки посилання на призначення заявленого об'єкта винаходу (корисної моделі) (для нових хімічних сполук - його можливе застосування);

(б) наявність у первинних матеріалах заявки описаних засобів і методів, за допомогою яких можливе здійснення винаходу (корисної моделі) в тому вигляді, як він (вона) охарактеризований в будь-якому пункті формули. Якщо такі відомості в матеріалах заявки відсутні, допускається, щоб засоби і методи, на які є посилання в заявці, були описані в джерелах інформації, що стали загальнодоступними до дати пріоритету винаходу (корисної моделі).

(с) Крім цього, у разі здійснення винаходу (корисної моделі) за будь-яким пунктом формули, перевіряють, що реалізація вказаного заявником призначення дійсно можлива.»

При цьому, при перевірці корисної моделі на відповідність умові патентоздатності «промислова придатність» відповідно до умов п. 6.5.1.1 Правил розгляду експертиза встановила наступне:

(а) у матеріалах заявки міститься посилання на призначення запатентованого об'єкта, а саме: «спосіб термічної обробки крупно модульних зубчатих коліс»;

(б) матеріали запатентованої корисної моделі містять описання засобів та методів, за допомогою яких можливе здійснення її у тому вигляді, як він охарактеризований у будь-якому пункті формули, зокрема викладена реалізація даного способу з відповідними поясненнями (див. рядки 13 сторінки 2 – рядки 15 сторінки 3 запатентованої корисної моделі);

(с) встановлено, що спосіб придатний для термообробки зубчатих коліс, що призводить до виникнення на робочій поверхні зуба загартованого шару глибиною 4-5 мм, твердістю HRS 61-63 одиниці (рядки 9-10 на 3 стор. опису), тобто, забезпечується підвищення твердості робочої поверхні зубів деталей, які можуть бути використані в коробках передач, редукторах, у тому числі механізми повороту кар'єрних екскаваторів, приводів кульових млинів, та знижується ймовірності аварійних руйнувань і витрат на ліквідацію наслідків аварії (останній абзац на 3 стор. опису запатентованої корисної моделі).

За результатами експертизи встановлено, що усі вимоги, зазначені у п. 6.5.1.1 Правил розгляду дотримані, тобто відповідно до умов п. 6.5.1.2 Правил складання та ч. 8 ст. 7 Закону «Спосіб...», викладений у формулі корисної моделі визнано таким, що **відповідає умові патентоздатності «промислова придатність».**

4. Перевірка новизни запатентованої корисної моделі згідно з ч. 3 ст. 7 Закону та відповідно до п. 6.5.2 Правил розгляду.

Відповідно до ч. 3 ст. 7 Закону:

Винахід (корисна модель) визнається новим, якщо він не є частиною рівня техніки. Об'єкти, що є частиною рівня техніки, для визначення новизни винаходу повинні враховуватися лише окремо.

При цьому, при перевірці формули запатентованої корисної моделі № 103171 встановили, що найближчим аналогом з рівня техніки є джерело **D1** (див. п. 1 даного висновку), в якому описано процес, що направлений на зміцнення поверхні зубців крупномодульних коліс з використанням дії плазмового нагріву та електромагнітного поля на деталі. Однак, у **D1** не описано, що нагрівання здійснюють дугою під кутом 70°-90° і коливної, відносно свого

u201504396

4

середнього положення, із частотою зовнішнього електромагнітного поля поперек поздовжньої лінії зубів, з амплітудою, що дорівнює 0,7-0,8 висоти зуба. Крім того, при обробці заготовок з підігрівом скануючою дугою швидкість переміщення дуги щодо зубів у формулі запатентованої корисної моделі не збігається із швидкістю, яку розраховують у відомому джерелі (див. математичну формулу (1) аналогу **D1**).

Також є відомою обробка заготовок плазмовим нагрівом (див. джерело **D2**), в якому описано підвищення якості обробки заготовок із високомарганцовистих сталей типу 110Г13Л використовуючи термічну обробку з нагріванням плазмою та заданою силою струму, як і формулі запатентованої корисної моделі. Однак, вказане технічне рішення не описує процес нагрівання, при якому дугу спрямовують фронтально до середини частини профілю зуба під кутом 70°-90°, не описують відповідну амплітуду обробки, що дорівнює 0,7-0,8 висоти зубів, та швидкість переміщення дуги щодо заготовки у формулі запатентованої корисної моделі має інше значення ніж швидкість, яку можна розрахувати у джерелі (див. математичну формулу (5) аналогу **D2**).

Таким чином, сукупність усіх ознак, що наведені у незалежному пункті формули запатентованої корисної моделі, не властива жодному із аналогів **D1**, **D2** та інших об'єктів, що відомі із документів рівня техніки (див. п. 1 даного висновку), тобто, запатентований «Спосіб...» не є частиною рівня техніки (умови п. 6.5.2.1 Правил розгляду), а відтак він є новим.

5. Висновок.

За результатами експертизи встановлено, що запатентована корисна модель за патентом України на корисну модель № 103171, **відповідає умовам патентоздатності корисної моделі**, визначеними для неї ч. 2 ст. 7 Закону, а саме:

запатентована корисна модель за опублікованою формулою є **промислово придатною та новою**.

Головний експерт



В.В. Гапочка

Телефон

4940573

Додаток 3





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **103171** (13) **U**
(51) МПК
C21D 9/32 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2015 04396	(72) Винахідник(и): Нечасєв Василь Павлович (UA), Рязанцев Антон Олександрович (UA)
(22) Дата подання заявки: 05.05.2015	(73) Власник(и): ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД "КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ", вул. ХХІІ Партз'їзду, 11, м. Кривий Ріг, Дніпропетровська обл., 50027 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.12.2015	(74) Представник: Кривенко Юрій Юрійович, реєстр. №255
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.12.2015, Бюл.№ 23	

(54) СПОСІБ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

(57) Реферат:

Спосіб термічної обробки крупномодульних зубчастих коліс включає нагрівання без оплавлення плазмовою дугою бічної поверхні зуба із заданою силою струму, переміщення дуги вздовж поздовжньої осі зубчастого колеса. Нагрівання здійснюють дугою, спрямованою фронтально до середини робочої частини профілю зуба під кутом 70°...90° і коливної, відносно свого середнього положення, із частотою зовнішнього змінного електромагнітного поля поперек поздовжньої лінії зубів, з амплітудою, що дорівнює 0,7-0,8 висоти зуба. При цьому переміщення дуги проводять поступально від одного торця зубчастого колеса до іншого зі швидкістю, що перевищує швидкість поширення температури в даному матеріалі.

UA 103171 U

UA 103171 U

Корисна модель належить до машинобудування, а саме до термічної обробки, зокрема до поверхневого гартування плазмовою дугою при зміцненні робочої поверхні зубів деталей з низьковуглецевої й легваної сталі для підвищення якості деталей і розширення технологічних можливостей шляхом обробки коліс із широким діапазоном значень модуля.

5 Відомий спосіб зміцнення робочої поверхні зубів деталей, зазначений у технічній літературі: Калашников А.С. "Технология изготовления зубчатых колес", Москва, "Машиностроение", 2004 р., включає індукційне нагрівання зуба шестірні. У зазначеному способі нагрівання здійснюють індуктором, який переміщується поступально уздовж зуба колеса або вала-шестірні.

10 Вищевказаний спосіб має ряд недоліків. При нагріві під гартування поліпшуваних середньовуглецевих і легованих сталей, застосовуваних для деталей зі зміцненням робочої поверхні зубів способом гартування ТВЧ, необхідно перегрівати робочу поверхню до 50-80 °С вище точки АС₃. Різке охолодження деталей в охолоджуючому середовищі для досягнення максимальної твердості може призвести до жолоблення й утворення мікротріщин на поверхні профільних деталей, які можуть розвинути в тріщини.

15 Найбільш близьким технічним рішенням, вибраним як прототип, є "Способ термической обработки зубчатых колес" (А.С. SU 1697427 А1, опубл. 09.01.90, выпуск № 1), який включає нагрівання без оплавлення плазмовою дугою бічної поверхні зуба із заданою силою струму, переміщення дуги вздовж поздовжньої осі зубчастого колеса.

20 Нагрівання здійснюють стисною електричною дугою, яку коливають змінним магнітним полем поперек поздовжньої лінії зубів, при цьому нагрівання поверхні, кожної западини між зубами, здійснюють зворотними рухами джерела нагрівання вздовж поздовжньої лінії зубів, а наприкінці кожного ходу зворотного руху джерела нагрівання змінюють середнє положення, відносно якого коливають електричну дугу, причому при переміщенні джерела нагрівання від вершини зуба до западини величину струму дуги плавно збільшують у 1,2...1,45 разу.

25 Зазначений спосіб має декілька недоліків. При нагріванні бічних поверхонь і западин зубів зубчастих коліс із модулем $m > 10$ мм за схемою, зазначеною в описі способу-прототипу, внаслідок значних розмірів зуба, відстань між катодом і деталлю стає критичною, що призводить до зриву факела плазмової дуги, необхідності повторного екстреного запалювання дуги та браку у вигляді оплавлення поверхневого шару деталі. Крім цього, нагрівання бічних поверхонь зубів за схемою прототипу здійснюється тепловим потоком по дотичній, що є недостатнім внаслідок зниження величини миттєвого питомого теплового потоку, і не забезпечує рівномірне зміцнення робочої поверхні зуба на достатню глибину.

30 В основу корисної моделі поставлена задача вдосконалення способу поверхневої плазмової термічної обробки робочих поверхонь крупномодульних зубчастих коліс за рахунок застосування схеми нагрівання скануючою плазмовою дугою, яка дозволяє реалізувати максимальний ККД нагрівання.

35 Технічний результат від використання запропонованої корисної моделі термічної обробки зубчастих коліс забезпечує підвищення твердості робочої поверхні зубів деталей, які можуть бути використані в коробках передач, редукторах, у тому числі механізми повороту кар'єрних екскаваторів, приводах кульових млинів, зниження ймовірності аварійних руйнувань і витрат на ліквідацію наслідків аварії.

Поставлена задача вирішується за рахунок способу термічної обробки крупномодульних зубчастих коліс, що включає нагрівання без оплавлення плазмовою дугою бічної поверхні зуба із заданою силою струму, переміщення дуги вздовж поздовжньої осі зубчастого колеса.

45 Згідно з корисною моделлю, нагрівання здійснюють дугою, спрямованою фронтально до середини робочої частини профілю зуба під кутом 70°...90° і коливної щодо свого середнього положення із частотою зовнішнього змінного електромагнітного поля поперек поздовжньої лінії зубів, з амплітудою, що дорівнює 0,7...0,8 висоти зуба, при цьому переміщення дуги проводять поступально від одного торця зубчастого колеса до іншого зі швидкістю, що перевищує швидкість поширення температури в даному матеріалі:

$$S_M = \left(\frac{437IU\eta_t\sqrt{\omega}}{\Theta_n\lambda B} \right)^2,$$

де S_M - швидкість переміщення дуги щодо заготовки, мм/хв.;

I , U - струм і напруга плазмової дуги;

η_t - тепловий ККД плазмової дуги;

55 Θ_n - температура аустенітного перетворення матеріалу деталі;

UA 103171 U

λ , Вт/см·°С і ω , см²/с - коефіцієнти тепло- і температуропровідності оброблюваного матеріалу відповідно;

B - ширина зони нагрівання (амплітуда сканування плазмової дуги), мм.

Заявлена корисна модель пояснюється схемою, на якій показано розташування джерела нагрівання й зон нагрівання в торцевій площині оброблюваного зубчастого колеса.

Як джерело плазмового нагрівання вибрано плазмотрон прямої дії, який складається з охолоджуваного водою корпусу 1 із соплом 2, електрода (катода) 3, каналу підведення плазмоутворюючого газу. Плазмотрон оснащено магнітною системою, що складається з двох охолоджуваних магнітопроводів 4 (система охолодження не показана), торці яких розташовані біля сопла 2 і перпендикулярні напрямку поздовжньої лінії зубів, двох електричних котушок 6, установлених на магнітопроводах 4 і приєднаних до регульованих джерел живлення змінного струму.

Спосіб реалізується наступним чином. Зубчасте колесо або вал-шестірня встановлюються на верстаті, генератором плазми є однодуговий плазмотрон постійного струму. Плазмоутворюючий газ - повітря. По розташуванню плазмової дуги щодо дугового каналу, а також по характеру впливу дуги на оброблюваний матеріал, він належить до плазмотронів прямої дії. Зниження локальності нагрівання плазмової дуги здійснюється за рахунок накладення на потік генерованої плазми зовнішнього змінного магнітного поля. Для створення зовнішнього магнітного поля, серійно випускний плазмотрон прямої дії 3 (ПВР-401) оснащують спеціальною магнітною системою. Плазмотрон генерує електричну дугу, яка горить між катодом 3 і бічною поверхнею зуба колеса 5 і в місці контакту дуги з поверхнею нагріває її. Крім цього, у зазорі між торцями магнітопроводів 4 на дугу впливають магнітним полем, а так як електрична дуга являє собою провідник зі струмом, то в магнітному полі на неї діє сила Лоренца, що відхиляє дугу в площині, яка паралельна торцям магнітопроводів 4 і перпендикулярна поздовжній лінії зубів. Таким чином, зміною напруги на котушках 6 магнітної системи забезпечується можливість зміни величини сили Лоренца, а отже, змінюється величина відхилення електричної дуги в магнітному полі, що дозволяє переміщати пляму нагрівання дуги по поверхні западини між зубами. Змінна напруга на котушках 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 як би витягується уздовж робочої поверхні зуба 6.

При реалізації даного способу для крупномодульних зубчастих коліс розтягують пляму нагрівання по всій робочій поверхні зуба, не зачіпаючи вершину й западину зуба, оскільки вони не беруть участь у зачепленні, та спрямовують дугу фронтально до середини робочої частини профілю зуба під кутом 70°...90°. Вплив плазмовою дугою фронтально під заданим кутом дозволяє забезпечити найбільше вкладення тепла в матеріал заготовки, оскільки менше значення кута приводить до збільшення відбиття теплового потоку в повітря й зниженню ККД нагрівання нижче 40 %, що неприпустимо для умов гартування. При цьому амплітуда сканування плазмової дуги становить 0,7...0,8 висоти зуба. Менше значення амплітуди встановлюють для зубчастих коліс із модулем $m \leq 15$, щоб уникнути перегріву вершини зуба після закінчення його термообробки по обидва боки. Крім цього, даний діапазон пояснюється тим, що при нагріванні по всій висоті лівого зуба, а потім правого в зоні западини виникають перехресні нерівномірно термічно оброблені ділянки, що приводить до несприятливих термічних напруг. Тому доцільно не прогрівати нижню частину западини.

Задавати більшу амплітуду коливань дуги, рівну висоті зуба або вище її, недоцільно також і тому, що горіння дуги може стати нестійким, і вона може згаснути. Повторне ж екстремне включення плазмової дуги приводить до оплавлення поверхні деталі в момент запалювання дуги, що є неприпустимим, оскільки приводить до браку.

Переміщення скануючої, уздовж робочої поверхні зуба, плазмової дуги здійснюють за рахунок механізму подачі верстата зі швидкістю, що перевищує швидкість поширення тепла в даному конкретному матеріалі заготовки, що забезпечує критичну швидкість зміцнення в поверхневому шарі без охолоджуючих засобів, у вигляді води або мастила.

Експериментальні результати дають можливість, при обробці заготовок з підігрівом скануючою дугою, розглядаючи умовну пляму нагрівання як лінійне рівномірно розподілене джерело теплоти, що швидко рухається. В результаті аналізу отриманих експериментальних досліджень записуємо формулу визначення швидкості переміщення плазмової дуги відносно заготовки (S_M):

$$S_M = \left(\frac{4371 U \eta_f \sqrt{\omega}}{\Theta_r \lambda B} \right)^2,$$

UA 103171 U

де I , U - струм і напруга плазмової дуги;

η_T - тепловий ККД плазмової дуги;

Θ_n - температура аустенітного перетворення матеріалу деталі;

λ , Вт/см $^{\circ}$ С і ω , см 2 /с - коефіцієнти тепло- і температуропровідності оброблюваного матеріалу відповідно;

B - ширина зони нагрівання (амплітуда сканування плазмової дуги), мм.

У результаті цього нагрівається смуга, ширина якої дорівнює 0,7...0,8 висоти зуба, а довжина - ширині зубчастого колеса.

У підсумку на робочій поверхні зуба виникає загартований шар глибиною 4...5 мм, твердістю HRC 61...63 одиниці, що відповідає вимогам, які пред'являються до приводів даного типу.

Використання корисної моделі, яка заявляється, забезпечує підвищення твердості робочої поверхні зубів деталей, які можуть бути використані в коробках передач, редукторах, у тому числі механізми повороту кар'єрних екскаваторів, приводах кульових млинів, зниження ймовірності аварійних руйнувань і витрат на ліквідацію наслідків аварії.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб термічної обробки крупномодульних зубчастих коліс, що включає нагрівання без оплавлення плазмовою дугою бічної поверхні зуба із заданою силою струму, переміщення дуги вздовж поздовжньої осі зубчастого колеса, який відрізняється тим, що нагрівання здійснюють дугою, спрямованою фронтально до середини робочої частини профілю зуба під кутом 70°...90° і коливної, відносно свого середнього положення, із частотою зовнішнього змінного електромагнітного поля поперек поздовжньої лінії зубів, з амплітудою, що дорівнює 0,7-0,8 висоти зуба, при цьому переміщення дуги проводять поступально від одного торця зубчастого колеса до іншого зі швидкістю, що перевищує швидкість поширення температури в даному матеріалі:

$$S_M = \left(\frac{4371 U \eta_T \sqrt{\omega}}{\Theta_n \lambda B} \right)^2,$$

де S_M - швидкість переміщення дуги щодо заготовки, мм/хв.;

I , U - струм і напруга плазмової дуги;

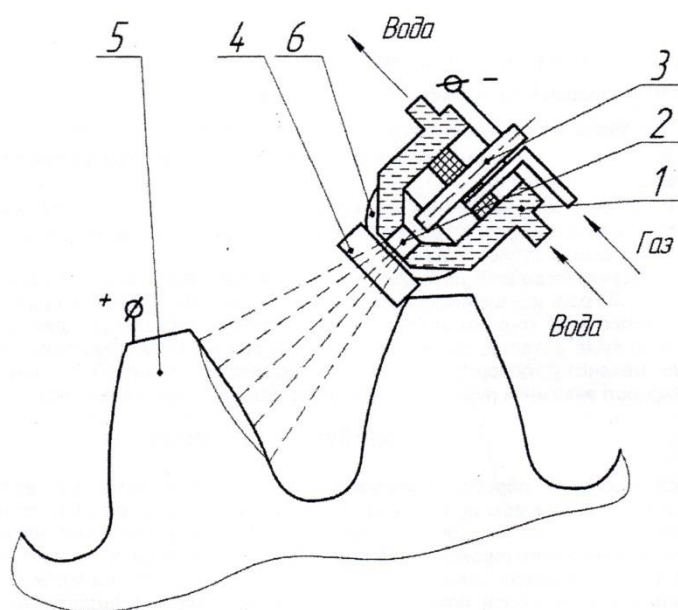
η_T - тепловий ККД плазмової дуги;

Θ_n - температура аустенітного перетворення матеріалу деталі;

λ , Вт/см $^{\circ}$ С і ω , см 2 /с - коефіцієнти тепло- і температуропровідності оброблюваного матеріалу відповідно;

B - ширина зони нагрівання (амплітуда сканування плазмової дуги), мм.

UA 103171 U



Комп'ютерна верстка О. Гергіль

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

Додаток И

Список публікацій здобувача 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 // Metalurgical 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. 2012г. – 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 // Сталій 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 зубчастих 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.