

Нечасв В.П.

Криворізький національний університет

Рязанцев А.О.

Криворізький національний університет

ТЕХНОЛОГІЯ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОВОГО ЗМІЦНЕННЯ НАВАНТАЖЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

Стаття присвячена підвищенню зносостійкості великомодульних зубчастих передач шляхом застосування інноваційного методу поверхневого плазмового зміцнення (ППЗ) робочих поверхонь зубів. Експериментально досліджено процес ППЗ, зроблена оцінка отриманих фізико-механічних властивостей та твердості оброблюваного матеріалу під час плазмового нагрівання. Проведено розрахунки на довговічність за параметром зношення. Встановлено, що застосування даного способу термічної обробки збільшує зносостійкість у 2,28 рази. Розроблено та створено комплекс спеціалізованого обладнання для реалізації технологічної схеми ППЗ робочих поверхонь зубчастих передач без оплавлення.

Ключові слова: абразивне зношення, поверхнєве плазмове зміцнення, структурно-фазові перетворення, концентроване джерело нагрівання.

Постановка проблеми. Одною з основних умов, якій має задовольняти технологічне обладнання, є його безвідмовна робота з необхідною надійністю та довговічністю відповідно до технічних умов експлуатації протягом заданого періоду часу. У гірничій промисловості знайшли широкого розповсюдження великомодульні відкриті передачі зовнішнього зачеплення, що входять до складу рудорозмельних млинів. Ключовими питаннями під час проектування і виготовлення зубчастих передач є вибір матеріалу і способу його зміцнення. Знос зубів є основним видом руйнування зубів відкритих передач. Запиленість робочої зони ставить відкриті зубчасті передачі в досить несприятливі умови роботи. Пил, що містить велику кількість твердих абразивних частинок, потрапляє на робочі поверхні зубів, змішується з мастилом і викликає їх інтенсивне зношування.

Аналіз пошкоджуваності зубчастих коліс дозволяє зробити припущення, що передчасний їх вихід з ладу зумовлений головним чином процесами в поверхневих шарах. Контактна витривалість поверхневого шару характеризується здатністю матеріалу протистояти розвитку викришування на робочій поверхні, що сприймає змінні контактні навантаження, і визначається конструктивними і технологічними факторами. Зміцнювальні технології формують структуру поверхневого шару, створюють основний рівень зміцнення зубів коліс, що визначає їх працездатність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Найбільший інтерес мають дослідження, спрямовані на встановлення загальних закономірностей абразивного зношення. Значний внесок до вирішення проблеми підвищення працездатності зубчастих передач конструкторськими, технологічними й експлуатаційними заходами присвячено безліч досліджень, що були проведені А.І.Беляєвим, В.М.Кудрявцевим, М.М.Малишевим, В.В. Орловим, О.І. Петрусевичем, Е.В. Рижовим, Д.Л. Юдіним, В.А. Гавриленко, В.К. Кудрявцевим, І.В. Крагельским та рядом іноземних вчених [1–5].

Аналіз літературних даних з проблеми дослідження свідчить про те, що наявні рекомендації по критеріях граничних станів високонавантажених зубчастих передач суперечливі та не повною мірою враховують взаємозв'язок між характеристиками контактних пошкоджень зубів і експлуатаційними властивостями передач під час комплексної оцінки факторів, що впливають на довговічність відкритих зубчастих передач, в тому числі параметрів зміцнених робочих ділянок зубчастих коліс.

Існують різні способи поверхневого зміцнення, що відрізняються способом нагріву, охолодження і розподілом температури (газополум'яна, індукційна, імпульсна). Основною відмінною особливістю методів поверхневого зміцнення висококонцентрованими джерелами нагріву є можливість отримання швидкостей нагріву та охолодження матеріалів, які на кілька порядків перевищують значення, характерні для традиційних мето-

дів зміцнення, що сприяє отриманню зміцнених шарів з недосяжним раніше рівнем експлуатаційних властивостей.

Перспективним напрямом підвищення зносостійкості робочих поверхонь зубів великомодульних зубчастих коліс є зміцнювальна термічна обробка робочої поверхні концентрованим потоком енергії, а саме плазмовим струменем [6]. Питання досліджень та розробок технологій плазмового зміцнення висвітлені в роботах Л.К. Лещинського, В.П. Токмакова, А.Г. Григор'янца, В.С. Крапошина, М.І. Анякіна, А.А. Бердникова, С.С. Самотугіна, Х.М. Рахімянова [7–9]. Однак тут необхідно враховувати, що технології поверхневого зміцнення мають свої специфічні особливості, і їх результативність залежить від врахування різноманітних факторів, що відображують як саму деталь, її хімічний склад, габарити, геометричну форму, вихідний стан поверхні, так і умови експлуатації. Проведений аналіз показує перспективи плазмового нагрівання, але немає відомостей і розробок, які можна застосувати до великомодульних зубчастих передач.

Формулювання цілей статті. Інтерес дослідників до проблеми використання низькотемпературної плазми для термічної й хіміко-термічної обробки сталей і сплавів об'єктивно свідчить на користь цього концентрованого джерела енергії (КДЕ), що володіє очевидними перевагами порівняно 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.

Таким чином, метою роботи є підвищення зносостійкості контактних поверхонь зубчастих передач шляхом поверхневого плазмового зміцнення (ППЗ). Сформульована мета зумовила необхідність розв'язання таких задач: експериментальне дослідження довговічності зубчастих передач, що пройшли ППЗ, їх розрахунки на довговічність за параметром зношення та аналіз структури, фазового складу та твердості поверхневого шару; розробка й створення комплексу оригінального спеціалізованого обладнання для реалізації технологічної схеми ППЗ робочих поверхонь зубів.

Виклад основного матеріалу. Ефект від плазмового зміцнення визначається підвищенням експлуатаційних властивостей деталі завдяки зміні фізико-механічних характеристик поверхневого шару, внаслідок утворення специфічної структури і фазового складу металу, а також отримання на поверхні залишкових напружень. Структурні

перетворення в цілому відповідають тим, що відбувається при об'ємному гартуванні, однак високі швидкості нагріву і охолодження викликають зміну співвідношень між структурними складниками, зміну їх морфології внаслідок підвищеної дефектності кристалічної будови [10, 11, 12].

Структура зміцненого шару після ППЗ характеризується великою твердістю та високою дисперсністю, дає визначальний вплив на зміну експлуатаційних характеристик зміцнених матеріалів – зносостійкість, механічні властивості (міцність, пластичність, тріщиностійкість, витривалість), тепло- і корозійну стійкість.

На початку необхідно сформулювати вимоги, яким повинно задовольняти джерело нагрівання в умовах ППЗ [11]: 1 – можливість регулювання ширини нагрівання; 2 – відсутність оплавлення поверхневого шару; 3 – забезпечення рівномірної глибини структурних перетворень; 4 – досягнення необхідної мікроструктури зміцненого шару.

Спосіб ППЗ великомодульних зубчастих коліс включає нагрів без оплавлення плазмовою дугою бічної поверхні зуба із заданою силою струму. Даний спосіб пояснюється схемою (рис. 1, а). У якості джерела плазмового нагрівання обрано плазмотрон прямої дії, який складається з охолоджуваного водою корпусу 1 із соплом 2, електрода 3, каналу підведення плазмотворювального газу (повітря). Зубчасте колесо або вал-шестірня встановлюються на верстаті, генератором плазми є однодуговий плазмотрон постійного струму. Зниження локальності нагрівання плазмової дуги здійснюється шляхом накладення на потік генерованої 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. У зазорі між торцями магнітопроводів 4 на дугу впливають магнітним полем, а оскільки 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. 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 ніби витягується уздовж робочої поверхні зуба 5.

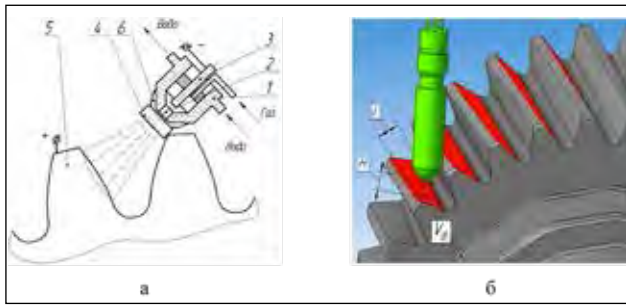


Рис. 1. Схема пристрою: а – вид в площині обробки; б – просторовий вид процесу обробки ($H = 45...60$ мм; $l = 35...65$ мм)

Для великомодульних зубчастих коліс розтягують пляму нагріву по всій робочій поверхні зуба, не зачіпаючи вершину та западину зуба, оскільки вони не беруть участь у зачепленні. Вплив плазмовою дугою фронтально під заданим кутом дозволяє забезпечити найбільше вкладення тепла в матеріал заготовки. При цьому амплітуда сканування плазмової дуги становить $0,7...0,8$ висоти зуба. 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.

Переміщення уздовж робочої поверхні зуба (рис. 1, б) плазмової дуги, що сканує, здійснюються за рахунок механізму подачі верстата зі швидкістю (V_d), що перевищує швидкість поширення тепла в матеріалі заготовки, це забезпечує критичну швидкість зміцнення в поверхневому шарі без охолоджуючих засобів. У підсумку на робочій поверхні зуба виникає загартований шар глибиною $4...5$ мм, твердістю HRC $61...63$ одиниці.

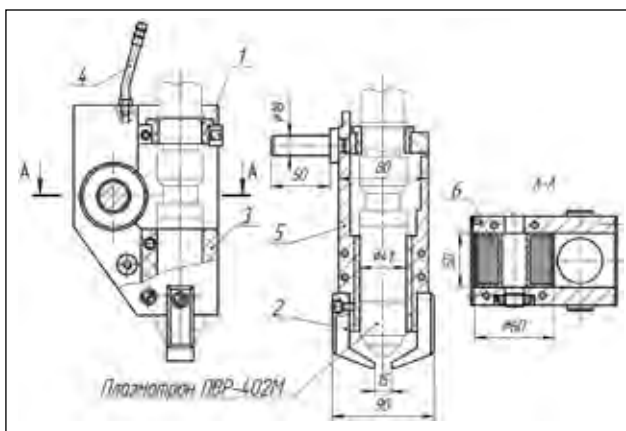


Рис. 2. Загальний вид плазмоторна з магнітно-відхиляючою системою: 1 – втулка ізолююча; 2 – наконечник; 3 – проставлення; 4 – штуцер; 5 – щока магнітопроводу; 6 – електрокотушка

Спосіб ППЗ великомодульних зубчастих передач реалізується на базі токарного верстату 1A660. У кінематичній схемі верстата був модернізований привід швидкого переміщення супорту шляхом установки перетворювача частоти фірми Delta Electronics – VFD 007 EL43A, що надало можливість змінювати швидкість лінійного переміщення плазмоторну вздовж поверхні заготовки. Маніпулятор із плазмоторном встановлюється в різцетримач. Деталь встановлюється в центрах верстата, циклічне обертання для переміщення нового зуба в зону нагрівання здійснюється вручну до упору. Для виключення оплавлення заготовки в момент запалювання плазмової дуги використовувався накладний фальш-анод, який фіксувався на торці заготовки за допомогою постійних магнітів. Установка для реалізації способу ППЗ містить: плазмову установку АПР-402; плазмоторн ПВР-402М з електромагнітним сканером (рис. 2); регульований трансформатор змінного струму для створення напруги в магнітній системі.

Загальний вид плазмоторна з магнітно-відхиляючою системою в процесі обробки великомодульної вал-шестірні ($m = 22$) в умовах виробництва представлено на рис. 3.



Рис. 3. Процес обробки вал-шестірні методом ППЗ в умовах виробництва

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

$$q_s = \frac{I \times U \times \eta}{l_s \times b_n}, \quad (1)$$

де U – напруга в ланцюзі плазмової дуги; η – ККД джерела нагрівання; l_s , b_n – розміри джерела нагрівання.

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

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

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

Вважаючи, що θ_{\max} дорівнює температурі плавлення, визначимо швидкість V_o , за якої буде виконувати

$$V_o = \left(\frac{I \times U \times \eta}{\theta_m \times v_n \times \ell_s \times \lambda} \right)^2 \times \frac{\omega \times v_n}{\pi}. \quad (3)$$

Процес ППЗ має ряд специфічних особливостей, внаслідок яких існують обмеження, що накладаються на параметри процесу нагрівання.

На рис. 4 показано зразок зі сталі 40X, поверхня якого піддавалась плазовому нагріву. На торцевій поверхні макрощліфу спостерігається в вигляді рівномірної світлої смуги шар, що є відмінним за травимістю від основного металу.



Рис. 4. Зразок, який був підданий нагріву плазовою дугою, що сканує

Аналіз структурно-фазових перетворень показав, що деталі, піддані ППЗ, мають високу поверхневу твердість та пластичність, що є важливими експлуатаційними показниками, які впливають на працездатність зубчастого зачеплення. З'ясовано, що за ППЗ сталі 40X у всьому діапазоні швидкості відносного переміщення деталі й плазмотрона (100..630 мм/хв), за яких проводилися дослідження, утворюється мартенситний шар різної глибини, що відрізняється від основної структури (рис. 5). У результаті утворюється досить складна структура металу, що складається з верхнього й нижнього бейніту, мартенситу й залишкового аустеніту [13].

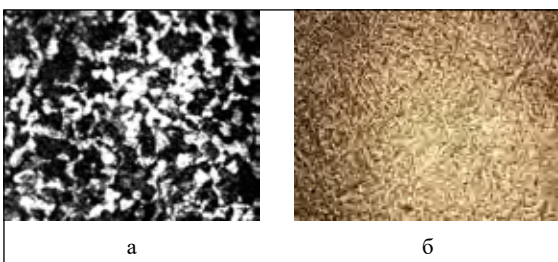


Рис. 5. Изменение структуры материала под влиянием плазменного нагрева (а – початкова структура; б – структура після ППЗ)

Наведені дані показують, що плазовий підігрів матеріалу припуску в умовах ППЗ може істотно змінити стан його структури, що може привести до значної зміни властивостей матеріалу в вигідну сторону. З метою вивчення властивостей середньолегованих сталей (40X) у процесі охолодження був зроблений вимір динамічної твердості (рис. 6). В процесі остигання відбувається зміцнення поверхневих шарів заготовки, нагрітих вище температури A_{c3} , причому різке збільшення твердості починається за умови охолодження до температури 200...230°C.

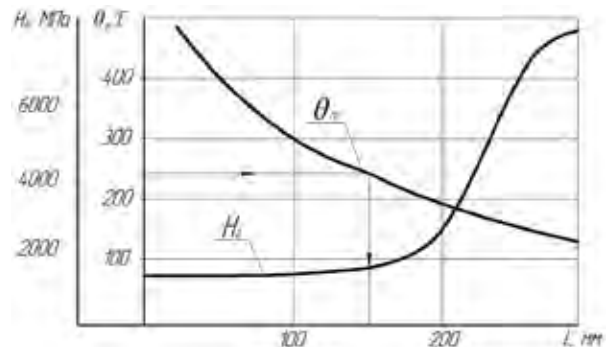


Рис. 6. Зміна температури й динамічної твердості в процесі охолодження після плазового нагрівання (сталь 40X; $I = 250$ А, $V_o = 300$ мм/хв; $d_c = 6$ мм; $Q_{\text{нов}} = 2,5$ м³/год)

Результати виміру мікротвердості представлені на (рис. 7). Із представлених графіків видно, що мікротвердість поверхневих шарів заготовки, обробленої на різних теплових режимах, на глибині 3...5 мм значно відрізняється за величиною від мікротвердості вихідної структури матеріалу.

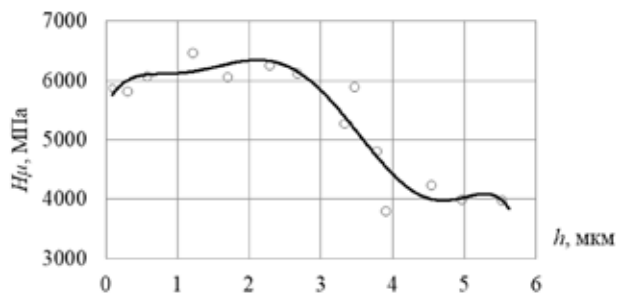


Рис. 7. Зміна мікротвердості поверхні після ППЗ

Проведені випробування (прискореним методом) показали, що ППЗ легованих сталей (40X) приводить до підвищення його абразивної зносостійкості в 2,28 рази, що можна пояснити структурою зміцнення, утворенням мартенситу та підвищенням твердості. На рис. 8 наведені криві зношування зубчастих передач, яке оцінювалося

за зміною товщини зуба по ділильній окружності до випробування та після певного часу роботи.

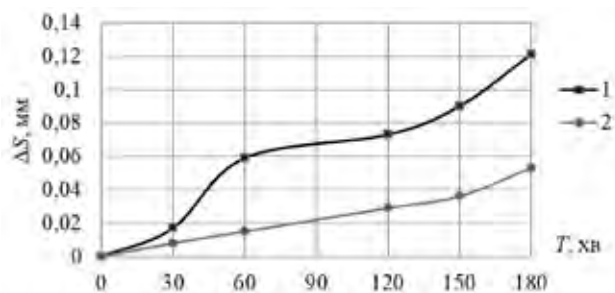


Рис. 8. Інтенсивність абразивного зношування зубчастих коліс: 1 – зношування незагартованого зубчастого колеса; 2 – зношування зубчастого колеса, підданого ППЗ

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

Висновки. В умовах ППЗ ефективність плазмової дуги як джерела нагрівання суттєво залежить від

співвідношення розмірів теплового джерела, його швидкості й теплової потужності; раціональним слід уважати таке їх співвідношення, за якого температура поверхні, що нагрівається, досягає, але не перевищує температури плавлення для даного матеріалу. Розроблено спосіб термічної обробки великомодульних зубчастих коліс, що включає нагрів бічної поверхні зуба без оплавлення плазмовою дугою, при цьому переміщення дуги проводять поступально від одного торця зубчастого колеса до іншого зі швидкістю, що перевищує швидкість поширення температури в даному матеріалі.

Експериментально встановлена закономірність формування загартованого шару під час ППЗ. Показано, що під час швидкісного нагрівання без оплавлення сканованою плазмовою дугою швидкість охолодження поверхневих шарів досягає швидкості гартування. Це забезпечує структурні перетворення в металі, формує зміцнений поверхневий робочий шар та забезпечує високі експлуатаційні характеристики поверхневого робочого шару: зносостійкість зубчастих передач підвищується в 2,28 рази.

Список літератури:

1. Карагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. Москва : Машиностроение, 1977. 526с.
2. Натаров А.П. Исследование влияния геометрических параметров зубчатых передач, работающих в средах с наличием абразива на их долговечность: автореф. дис. ... канд. техн. наук.:05.02.04. Харьков, 1978. 28 с.
3. Ямпольский Г.Я., Крагельский И.В. Исследование абразивного износа элементов пар трения качения. Москва : Наука, 1973. 63 с.
4. Antoni Skoc, Jacek Spalek. Kontemporary directions and methods of studying bevel gears working in mining machines drives. Acta Montanistica Slovaca. 2002. Vol. 3. P. 205–207
5. Harris, T., W. Yu. Lundberg-Palmgren Fatigue Theory: Considerations of Failure Stress and Stressed Volume. Transactions ASME Journal of Tribology. 1999. Vol. 121. P. 85–89.
6. Ryazantsev A.A. Analysis of means of reliability and service life growth for open gear drive of ore-pulverizing mills. Metallurgical and Mining Industry. 2014. № 4. P.16–22. URL: <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/4.2014.pdf>.
7. Rolf Roggen. Durcissement Super ficial par Plasma des aciers au carbone des fonts. Rev. Metallurgie. 1979. №7. P. 532–537.
8. Самогугин С.С., Пуйко А.В., Соляник Н.Х. Эксплуатационные свойства инструментальных сталей после комплексного объемно-поверхностного упрочнения. Металловедение и термическая обработка металлов. 1997. №5. С. 2–6.
9. Домбровский Ю.М., Бровер А.В. Обработка стали воздушно-плазменной дугой со сканированием. Металловедение и термическая обработка металлов. 1999. № 1. С. 10–13.
10. Резников Н.А., Шатерин М.А., Кунин В.С., Резников Л.А. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом. Москва : Машиностроение, 1986. 232 с.
11. Нечаев В.П., Рязанцев А.А. Особенности тепловых процессов при обработке заготовок с плазменным нагревом. Вісник Криворізького технічного університету. 2010. Вип. 26. С. 157–160.
12. Домбровский Ю.М. Технологический комплекс для изучения плазменного нагрева. Применение новых материалов в машиностроении : межвуз. сб. научн. тр. ДГТУ. Ростов-на-Дону, 1997. С. 104–107.
13. Богомолова Н.А. Практическая металлография. Москва : Высшая школа, 1978. 272 с.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ НАГРУЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

Статья посвящена повышению износостойкости крупномодульных зубчатых передач за счет применения инновационного метода поверхностного плазменного упрочнения (ППУ) рабочих поверхностей зубьев. Экспериментально исследован процесс ППУ, выполнена оценка полученных физико-механических свойств и твердости обрабатываемого материала при плазменном нагреве. Проведены расчеты на долговечность по параметру износа. Установлено, что применение данного способа термической обработки повышает износостойкость в 2,28 раза. Разработан и создан комплекс специализированного оборудования для реализации технологической схемы ППУ зубчатых передач без оплавления.

Ключевые слова: абразивное изнашивание, поверхностное плазменное упрочнение, структурно-фазовые превращения, концентрированный источник нагрева.

TECHNOLOGY OF PLASMA CASE-HARDENING OF LOADED SUPPORT SURFACE DETAILS

The article is devoted to the increase of wear resistance of large-modular gears due to the application of the innovative method of plasma case-hardening (PCH) working surfaces of teeth. The process of PCH has been experimentally investigated, an estimation of the obtained physical and mechanical properties and hardness of the processed material during plasma heating has been made. The process of PCH has been experimentally investigated, an estimation of the obtained physical and mechanical properties and hardness of the processed material during plasma heating has been made. 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 technology system of PCH of the gears' working surfaces without melting.

Ключові слова: abrasive wear; plasma case-hardening, structural-phase transformations, concentrated heating sources.