

**О.Й. Мажейка, проф., канд. техн. наук, С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук,  
Ю.В. Рябоволик, асп.**

*Кіровоградський національний технічний університет*

## Застосування електродугового напилення з пошаровою мікроплазмовою обробкою при нанесенні зносостійких покриттів

В статті запропоновано комбінований технологічний метод нанесення зносостійких електродугових покриттів з супутньою пошаровою мікроплазмовою обробкою. Здійснено розрахунки температурних полів і температурних циклів в приповерхневому шарі циліндрової деталі при русі джерела теплоти по гвинтовій лінії.

**електродугове напилення, мікроплазмова обробка, покриття**

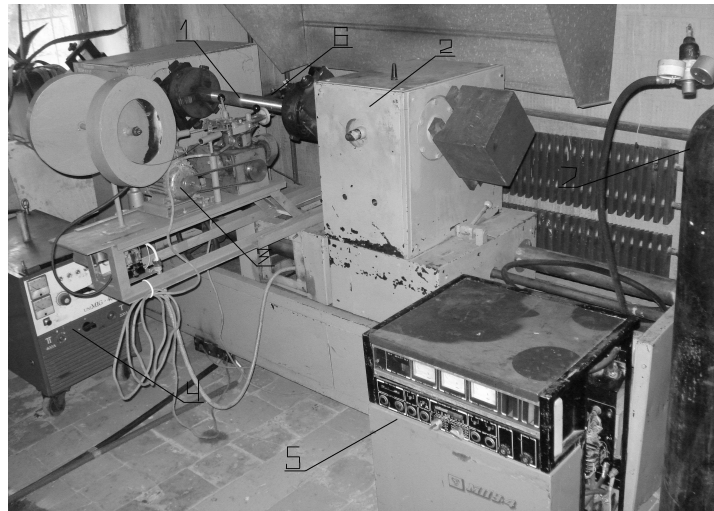
**Стан проблеми та постановка задачі.** Одним з найбільш розповсюджених способів відновлення деталей є ЕДН [1,2]. В даний час для відновлення деталей пар тертя застосовується напилення різнорідними дротами – порошковим та суцільнотягнутим. Застосування цієї технології дозволяє забезпечити високі трибомеханічні властивості покриття. Разом з тим покриття формується з різнорідних за властивостями ламелей, розділених по кордоні розділу шаром оксидів, карбідів та боридів. При цьому покриття мають значну поруватість від 7 до 18 %. Незважаючи на позитивний вплив на трибологічні властивості, подібна структура покриття знижує втомну міцність покриття під дією ударних навантажень через розвиток втомної тріщини по границі розділу ламелей, що особливо актуально при відновленні корінних та шатунних шийок колінчастих валів двигунів внутрішнього згорання. Крім того при випробуванні покриттів незакріпленим абразивом встановлено, що в покриттях в першу чергу зношуються м'які ламелі по кривій найменшого спротиву. Після цього острівці твердої фази виступають із матриці, а потім вириваються з неї під дією навантажень [3]. Вплив цього фактору особливо відчутний при відновленні внутрішніх поверхонь корпусів насосів та компресорів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій з розглядуваної проблеми показав, що для усунення цих недоліків доцільно було б піддати композиційне покриття оплавленню за рахунок нагріву до температури плавлення легкоплавкої складової та забезпечити підігрів поверхні основи для підвищення міцності зчеплення. Традиційно оплавлення та підігрів напилених деталей здійснюють газовим пальником, ТВЧ, в печі з контрольованою атмосферою. [4] Застосування для цього висококонцентрованих джерел нагріву (плазмових, лазерних, електроннопроменевих) надає можливість в широких діапазонах регулювати умови кристалізації оброблюваного матеріалу, позитивно впливаючи на його структуру і фізико-механічні властивості [5,6]. Проте оплавлення висококонцентрованими джерелами нагріву шарів завтовшки більше 0,3-0,4 мм викликає або несплав їх з матеріалом основи, або перегрів поверхневої зони. Це приводить до неоднорідності структури і властивостей по товщині напиленого шару. Це особливо актуально при відновленні деталей поверхні яких в процесі подальших ремонтів піддаються перешліфовуванню під ремонтні розміри.

В зв'язку з цим необхідно розробити такі технологічні прийоми обробки напилюваного покриття, які дозволяють зберегти його високі трибологічні

характеристики, забезпечивши при цьому отримання високих однорідних властивостей шару, що наноситься та підвищення його адгезійної і когезійної міцності. При цьому необхідно здійснити проплавлення до температури плавлення легкоплавкої складової композиційного покриття. Важливо також забезпечити низький термічний вплив на деталь.

Для вирішення поставленого завдання була використана технологія електродугового напилення з супутньою пошаровою мікроплазмовою обробкою. Комплект обладнання зображено на рис.1.

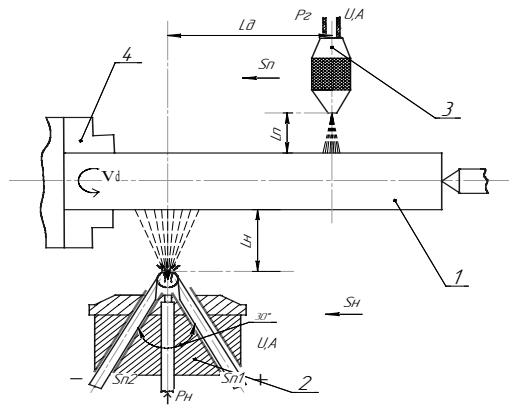


1 - оброблювана деталь; 2- обертач; 3- електродуговий розпилювач; 4- джерело живлення електродугового розпилювача; 5-установка МПУ-4; 6- мікроплазмовий пальник УС.ДСР - 45- 002; 7- система газозабезпечення

Рисунок 1- Комплект обладнання для напилення покриття з пошаровим мікроплазмовим оплавленням

За допомогою електродугового розпилювача захисний шар напилювався на поверхню деталі, що обертається. Одночасно з напиленням проводилось мікроплазмове оплавлення спочатку матеріалу основи, а потім кожного шару покриття. Оплаваючий плазмотрон розташовувався на діаметрально протилежній стороні деталі по відношенню до електродугового розпилювача. Неприпустимо поєднання зон напилення і оплавлення, оскільки в цьому випадку напилювані частинки осідатимуть на перегрітій поверхні, що істотним чином понизить швидкість їх кристалізації і погіршить будову і властивості шару. Процес вели в декілька проходів до отримання покриття заданої товщини.

Для визначення технологічних параметрів процесу (рис.2) при напиленні та пошаровому оплавленні покриттів велике значення мають термічні цикли процесу [5, 6], які визначають умови взаємодії зміцнюючих фаз з матрицею твердого розчину в процесі її перекристалізації, а також інтенсивність дифузійного переміщення заліза з основного металу в покриття. При оплавленні напилених покриттів параметри режиму, що безпосередньо визначають термічний цикл - температура нагріву, час витримки, швидкість охолодження і ін. - роблять істотний вплив на структуру, адгезійні і міцнісні властивості матеріалу покриття і його зносостійкість.



1 - оброблювана деталь; 2 – апарат електродугового наплення; 3 - головка мікроплазмової обробки; Vd – швидкість обертання деталі; Pн – тиск розпилюючого газу; Pг- тиск плазмоутворюючого та захисного газу; Ln- відстань від сопла розпилювача до деталі; Lп - відстань від сопла мікроплазмового пальника до деталі Lд – відстань між зонами термічного впливу металоповітряного струменю та плазмової дуги; Sh та Sp – горизонтальна подача розпилювача та мікроплазмової головки відповідно

Рисунок 2 - Схема процесу електродугового наплення з мікроплазмовою обробкою

З метою вибору оптимальних параметрів режиму мікроплазмової обробки, розраховували термічні цикли і температурні поля в приповерхневому шарі циліндрових деталей . Для цього визначали режими, які сприяли нагріву в необхідному температурному інтервалі, а також товщину оплавленого шару і встановлювали аналітичну залежність між основними параметрами дії плазмової дуги і температурним полем оброблюваної поверхні. При розрахунках температурних полів застосовували метод суперпозиції - накладення в часі процесів вирівнювання температури від дії миттєвих зосереджених джерел, прикладених в певні моменти часу у відповідних точках тіла.

Приймали наступні допущення: початкова температура тіла і навколишнього середовища рівна нулю; джерело теплоти (плазмова дуга) точкове, переміщається по поверхні циліндра по деякій довільній гвинтовій лінії постійного кроку; ефективна потужність джерела постійна в часі; теплообмін на поверхні металевого тіла при високій швидкості процесу вважається адіабатичним, тобто коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  значно менше коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  і співвідношення  $(\alpha / \lambda) > 0$ ; теплофізичні властивості матеріалу ( $\alpha, \lambda$  - коефіцієнти температуро - і теплопровідності) приймали постійними і відповідними середній температурі процесу (500°C) [5];  $\lambda = 18$  Вт/м·°C;  $\alpha = 4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с; не враховується теплота фазового переходу, що поглинається на передній межі плями нагріву при плавленні легкоплавкої фази оброблюваного покриття і що виділяється згодом при її кристалізації.

З урахуванням вказаних допущень температурне поле в приповерхневому шарі циліндрового зразка розраховували по формулах, одержаним методом інтегральних перетворень Лапласа-Карсона [6].

Температура точки у момент часу  $t$  в циліндровій системі координат  $r, \varphi, z$  на  $(m+1)$ -му обороті рівна

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda v_\varphi} \sum_{i=0}^m \left\{ \frac{1}{\Delta t_i} \exp \left[ -\frac{(R-r)^2 + (z-v_z \xi_i)}{4\alpha \Delta t_i} \right] \right\},$$

де  $q$  - потужність теплового джерела;

$R$  - радіус циліндрового зразка;

$v_{\varphi}$  - лінійна швидкість обертання;

$\Delta t_i$  - час від початку 1-го обороту;

$V_z$  - лінійна швидкість переміщення джерела уздовж осі Z;

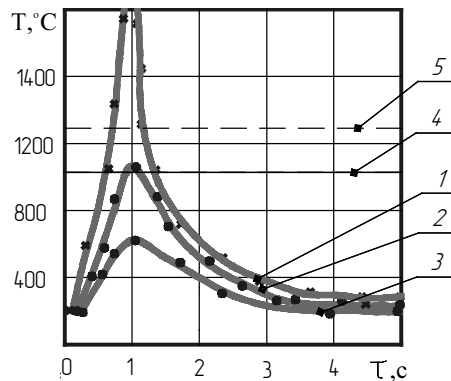
$\xi_i = \frac{\varphi + 2\pi i}{\omega}$  - момент часу, в який на  $(i+1)$ -му обороті кут знаходження теплового

джерела рівний  $\Phi$  ( $\omega$ - кутова швидкість).

Вираз для точкового джерела в достатній мірі можна застосувати для розрахунку температурних полів при розосередженому тепловому навантаженні на відстані, що перевищує діаметр плями джерела нагріву (в даному випадку стислої дуги), тобто при  $\Delta t_i > \tau_T$ , де  $\tau_T = \frac{d}{2v_{\varphi}}$  - діаметр плями джерела нагріву).

На підставі приведеної формули були розроблені два обчислювальні алгоритми і складені програми для ПЕОМ, що дозволяють розраховувати розподіл температури в циліндровому зразку для будь-якого заданого відрізка часу або простору при певному режимі рухомого по гвинтовій лінії теплового джерела, якщо задані його потужність, швидкості обертання і подовжнього переміщення. На основі розроблених програм розраховані температурні поля і термічні цикли в циліндровому зразку на прикладі мікроплазмової обробки напилюваних покриттів.

Нагрів і охолодження при мікроплазмовій обробці точок покриття, що лежать на різній глибині від поверхні зразка, представлені на рис. 3.

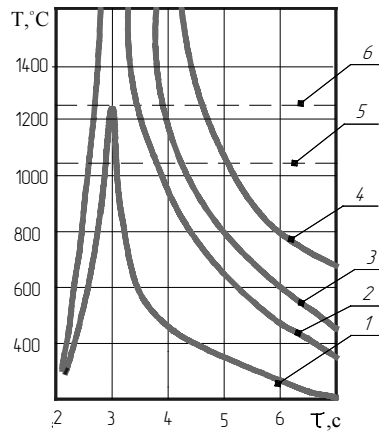


1 - на поверхні; 2 - на глибині 0,5 мм; 3 - те ж, 1 мм ( $q = 1000$  Вт,  $\omega = 0,5$  с<sup>-1</sup>,  $v_z = 3,18$  мм/с, ;  
4 - температура плавлення легкоплавкої складової КП; 5 - температура плавлення КП

Рисунок 3 - Термічні цикли точок, розташованих на різній глибині зразка діаметром 50 мм

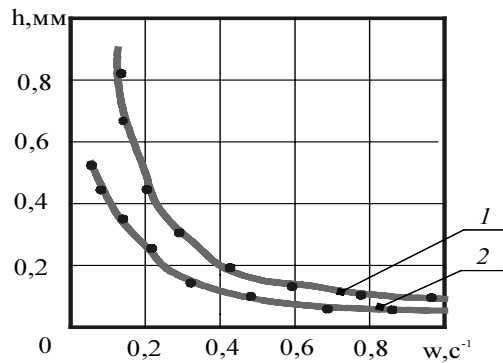
Видно, що нагрів покриття по товщині зразка нерівномірний: має місце значний перегрів точок, розташованих на поверхні, і недостатній нагрів точок на глибині 1 мм. Для якісного оплавлення необхідний нагрів в інтервалі температур від 1050 до 1280 °С, тобто вище за температуру плавлення пластичної складової сплаву (біля 1050 °С), але нижче за температуру плавлення зносостійкої компоненти (1280 °С). З урахуванням цієї вимоги було запропоновано виконувати мікроплазмову обробку, пошарово (за один прохід мікроплазмового пальника обробляти шар завтовшки 0,2-0,4 мм).

На рис. 4 представлені термічні цикли для точки, розташованої на глибині 0,2 мм від поверхні, при різних кутових швидкостях обробки матеріалу покриття. Видно, що із збільшенням швидкості знижується максимальна температура нагріву даної точки, розташованої на певній глибині від поверхні, наслідком чого є зменшення глибини проплавлення оброблюваного матеріалу (рис. 5)



1 - 0,5 і 31,8; 2 - 0,33 і 21,2; 3 - 0,25 і 16,4 - 0,20 і 13 ( $q = 1000$  Вт); 4 - температура плавлення легкоплавкої складової КП; 5 - температура плавлення КП

Рисунок 4 - Термічні цикли точок на глибині 0,2 мм при різних  $w$  ( $c^{-1}$ ) і  $v_z$  (мм/с)



1 - 1200; 2 - 750

Рисунок 5 - Залежність глибини проплавлення  $h$  від  $w$  при  $q$ , рівному (Вт)

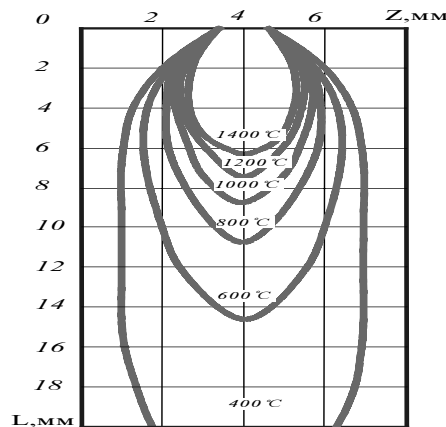


Рисунок 6. - Температурне поле поверхні деталі при плазмовій обробці ( $q$  ( $w$  і  $v_z$  - див. рис. 3)

Загальна картина нагріву оброблюваної циліндрової поверхні представлена температурним полем (рис. 6) у вигляді ізотерм, розташованих за рухомим джерелом. Проекція на вісь абсцис перетину найбільш широкої частини температурної кривої при  $1050$  °C дозволяє визначити ширину сліду обробки. Відповідно до цього можна вибрати крок обробки за умови оплавлення всієї площі покриття (сусідні зони оплавлення

повинні стикатися один з одним).

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень були вибрані наступні режимні параметри мікроплазмової обробки, напилюваних покриттів: струм розряду дуги 20-40 А, напруга дуги 55-60 В, відстань від зрізу сопла до виробу 10 мм, витрата плазмоутворюючого газу 1,5-2,5, а захисного - 5 л/хв., лінійна швидкість обертання зразка 18-25 м/год, крок між витками 3- 4 мм.

## Висновки

1. Пошарова мікроплазмова обробка напилюваних покриттів з різнорідних дротів дозволяє підвищити їх однорідність.

2. Розрахунки температурних полів і температурних циклів в приповерхневому шарі циліндрової деталі при русі джерела теплоти (мікроплазмової дуги) по гвинтовій лінії дозволяють вибрати режимні параметри пошарової мікроплазмової обробки напилюваних покриттів.

## Список літератури

1. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. - М.: Машиностроение, 1985.- 240 с.
2. Кречмер З. Напыление металлов, керамики и пластмасс.- М.: Машиностроение.1966. - 432 с.
3. Маркович С.І. Дослідження зв'язку зносостійкості з фізико-механічними властивостями покриттів, нанесених електродуговим напиленням різнорідних дротів // Проблеми тертя та зношування. – Київ, 2007. - №46. С. 16-18.
4. Ивашко В.С., Куприянов И.Л., Шевцов А.И. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий. Минск.: Наука і техника. 1996. – 375.
5. Чачин А. Н., Кардаполова М. А., Спиридонов И. В. Использование лазерного нагрева для управления триботехническими свойствами газотермических покрытий // Технологическое управление триботехническими характеристиками узлов машин: Сборник. Кишинев, 1985.- С. 18—19.
6. Спиридонов Н. В., Кардаполова М. А., Девойно О. Г. Влияние лазерного нагрева на износостойкость композиционных покрытий // Трение и износ.- 1988.- № 1.- Т. 9. - С. 60—65.

В статье предложен комбинированный технологический метод нанесения износостойких электродуговых покрытий с сопутствующей послойной микроплазменной обработкой. Осуществлены расчеты температурных полей и температурных циклов в приповерхностном слое цилиндрической детали при движении источника теплоты по винтовой линии.

In the article the combined technological method is offered causing wear proof electro- arc coverages with a concomitant layer by plasma treatment. The calculations of the temperature fields and thermocycles are carried out in the superficial layer of cylinder detail at motion of source of warmth on a spiral line.