

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ УМОВ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

Предложено и проанализировано несколько способов лазерно-плазменной наплавки рабочих элементов деталей машин и инструментов. Освещается методика вычисления распределения температур и скоростей нагрева порошкового материала при действии лазерно-плазменного источника. Показано, что предложенная методика позволяет определить условия получения порошковым материалом предварительно заданной температуры при прохождении сквозь плазменную струю без изменения его свойств. Приведены результаты экспериментальной проверки рассчитанных режимов лазерно-плазменной наплавки.

There have been offered and analyzed some ways of laser-plasma alloying of machine working elements and instruments. It has been illustrated a methodology of calculation of temperature distribution and heating rate under the influence of laser-plasma heating source of the powder material.

It has been shown that the offered methodology lets determine conditions for obtaining of the powder materials before the given temperature during its passing through a plasma jet without changing the properties of the powdered material. There have been given the results of experimental check of calculated regimes of laser-plasma alloying.

Вступ

В різних галузях промисловості широко використовуються машини, деталі яких працюють в екстремальних умовах. Внаслідок цього окремі ділянки таких деталей швидко зношуються, втрачаючи геометричну форму і розміри. Головним механізмом спрацювання таких виробів є абразивне зношування в умовах дії агресивного середовища, підвищених температур, високих питомих тисків, відсутності мастил або обмежених умов змащування. Надзвичайно ефективними способами збільшення тривалості їх експлуатації є технології відновлювання. Максимальний ефект ці технології забезпечують при їх застосуванні до складних і дорогих виробів (турбін енергетичних установок, колінчастих валів двигунів, деталей бурового обладнання та інше). Лазерна технологія наплавлення з метою відновлювання та зміцнення на відміну від широко розповсюджених (газо-полум'яної, плазмової та інших) дозволяє вирішити цю проблему без таких негативних явищ, як залишкові деформації, котрі не можна виправити наступним рихтуванням або механічною обробкою. Але при збільшенні площі поверхонь деталей, які піддаються зношуванню, виникає необхідність підвищення потрібної енергії лазерного випромінювання. Це обумовлює зростання потужності лазерного обладнання, вартість якого змінюється за експонентою. Відповідно з цим зростає і собівартість процесу наплавлення. Тобто, виникає необхідність удосконалення процесу лазерної обробки за рахунок використання більш дешевих допоміжних джерел енергії, що дозволило б при забезпеченні високої конкурентоздатності радикально збільшити його продуктивність без суттєвого підвищення вартості [1-3, 5].

У зв'язку з цим розвиток набули дослідження комбінованого процесу лазерного газопорошкового наплавлення з використанням додаткового плазмового джерела енергії, де функції кожного джерела енергії чітко розмежовані. Енергія плазми використовується виключно на підготовчий стадії процесу – транспортуванні та підігріванні порошку до температури 0,8-0,9Тпл. Лазерний промінь розплавляє певний об'єм матеріалу основи і доводить до температури плавлення підігрітій плазмою порошок. Наведена технологія дозволяє істотно збільшити продуктивність наплавлення без суттєвого підвищення собівартості процесу.

Метою даного дослідження є розробка комбінованого процесу лазерно-плазмового наплавлення, як технологічної системи з виявленням основних керуючих технологічних параметрів та встановлення зв'язків між ними й характеристиками поверхневого шару та експлуатаційними властивостями виробів. Результатом даної роботи також є алгоритм визначення оптимальних значень керуючих параметрів, що дозволяють управляти процесом і отримувати якісні наплавлені шари.

Можливі різні способи комбінованого лазерно-плазмового наплавлення [2 – 3, 5]. Дуже привабливою є інтегральна схема з послідовною дією різних джерел енергії. При такій схемі оптимально використовуються як в часі, так і в просторі, різні джерела енергії. Наведена схема дозволяє практично безмежно збільшувати продуктивність наплавлення без втрати локальності процесу і нерівноцінного підвищення його собівартості.

Для отримання точного розподілу температур в зоні нагріву навіть у найпростіших випадках намагаються застосовувати чисельні розрахунки, оскільки завдання лазерного нагріву суттєво нелінійне, внаслідок залежності від температури теплофізичних характеристик матеріалів та коефіцієнта поглинання лазерного випромінювання поверхнею.

Для реалізації процесу лазерно-плазмового наплавлення необхідно визначити його основні фактори та параметри. Схема процесу представлена на рис.1.

Лазерно-плазмове наплавлення здійснюється шляхом введення попередньо нагрітої до певної температури газопорошкової суміші (рис. 1), що надходить у ванну розплаву з масовою витратою G , під кутом α . Остання

утворюється в матеріалі деталі при дії лазерного випромінювання з потужністю P , сфокусованого за допомогою лінзи до діаметра плями фокусування d_0 . При цьому оброблювана деталь переміщується відносно лазерного променя зі швидкістю V .

При розплавленні порошку й частковому підплавленні матеріалу основи з наступним швидким охолодженням, на поверхні формуються структури характерні для компактного матеріалу. На границі "покриття-основа" за рахунок механічного перемішування й дифузійних, або аналогічних їм, пов'язаних з масоперенесенням, процесів утворюються перехідні структури. Ці перехідні шари визначають міцність зчеплення наплавленого шару з основою, тобто чим товще шар і чим більш рівномірно змінюються в ньому властивості, тим краще. З іншого боку, чим менше матеріал, що наплавляється, переміщується з матеріалом основи, тим краще можна прогнозувати експлуатаційні характеристики наплавлених шарів. Тобто товщина наплавленого шару повинна бути оптимальною.

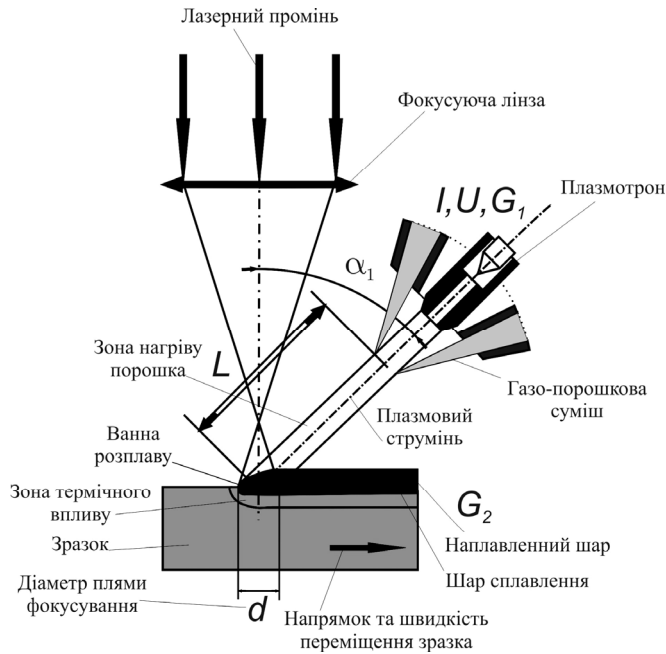


Рис. 1. Схема лазерно-плазмового наплавлення

Відповідно з цим, якість і розмірні характеристики наплавлених шарів визначаються температурою нагрівання й часом дії лазерного випромінювання. Крім цього, якість шарів значною мірою залежить від рівня напружень, у тому числі й залишкових, що формуються на етапі охолодження.

Основними параметрами, що визначають всі фізико-хімічні процеси, що протікають у поверхневому шарі при лазерно-плазмовому наплавленні, є - температура нагрівання (T_m), час нагрівання (t_m), швидкість охолодження (V_c). Ці параметри перебувають у прямій залежності від ряду факторів, пов'язаних з лазерним променем (довжина хвилі, потужність й її розподіл, розмір і форма плями фокусування, поляризація), оброблюваною деталлю (початкова температура, форма, маса,

хімічний склад, теплофізичні й оптичні властивості), присутністю оксидної плівки на поверхні деталі (шорсткість поверхні), порошком, що наплавляється, (температура, хімічний склад, теплофізичні властивості, витрата, напрямок і кут подачі, дисперсність), умовами реалізації процесу (швидкість наплавлення, температура оточуючого середовища, швидкість транспортуючого газу, технологічна схема). Змінюючи параметри процесу наплавлення, можна керувати розмірними, якісними й експлуатаційними характеристиками поверхонь деталей.

Для розв'язання задачі визначення оптимальних значень керуючих факторів було розроблено алгоритм розрахунку технологічних параметрів процесу лазерного наплавлення з попереднім нагріванням порошку у плазмовому струмені.

Для початку розрахунку за даним алгоритмом необхідно попередньо вибрати порошковий матеріал, що буде наплавлятися на поверхню, в залежності від матеріалу основи й умов праці відновлюваної деталі. На першому етапі вибирається хімічний склад, вводяться вихідні данні нагрівання порошку, бажана дисперсність порошкового матеріалу, відповідно до заданої якості наплавленої поверхні. Після цього розраховуються теплофізичні характеристики порошкового матеріалу, визначаються характеристики плазмотрону й плазмового струменя, витрати дозуючого пристрою, кут подачі порошкового матеріалу та відстань від зрізу плазмотрона до точки введення порошку в плазмовий струмінь.

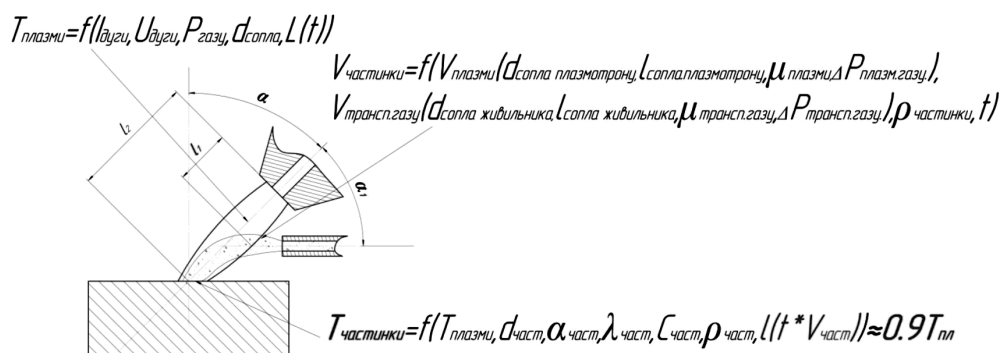


Рис. 2. Схема подачі та нагріву порошкового матеріалу

Для нагрівання порошку до визначеної температури, яка становить $0,9T_{\text{плавл}}$ матеріалу, при заданій витраті дозуючого пристрою, необхідно знайти ефективну довжину плазмового струменя та його енергетичні

характеристики, що забезпечують нагрівання частинок порошкового матеріалу, що пролітають вздовж струменя. Для цього було використано відповідну математичну модель, за якою було розраховано ефективність нагріву дисперсних матеріалів у плазмових потоках [4]:

$$\eta_{ПП} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \eta_E dt \quad (1)$$

де t – поточний час; T – повний час нагріву матеріалу.

Для моделювання процесу нагрівання частинки у плазмовому струмені було прийнято наступні умови: частинка має ідеальну сферичну форму; частинка є однорідним, ізотропним тілом; внутрішні джерела відсутні (рис.2), порошковий матеріал нагрівається весь, без втрат на розпилювання.

В цьому випадку залежність (1) зводиться до рівняння теплопровідності:

$$\rho_{П} \cdot C_{PЧ} \cdot \frac{dT_{Ч}}{dt} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(r^2 \cdot \lambda_{Ч} \cdot \frac{\partial T_{Ч}}{\partial t} \right) = 0 \quad (2)$$

де $\rho_{П}$ – густина газового потоку, $г/м^2$; $C_{PЧ}$ – теплоємність часток порошку, $Дж/(кг \cdot К)$; $T_{Ч}$ – температура порошку, $К$; r – радіус порошокинки, $м$; $\lambda_{Ч}$ – теплопровідність частинки порошку, $Вт/м \cdot К$.

В якості граничної умови приймалась:

$$\lambda_{Ч} \cdot \frac{dT_{Ч}}{dt} \Big|_{r=R} - \alpha \cdot \left(\frac{H_{П}}{C_{PЧ}} - T_{Ч} \Big|_{r=R} \right) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{Ч}^4 = 0 \quad (3)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, $Вт/(м^2 \cdot К)$; ε – ступінь чорноти порошку; σ – постійна Стефана – Больцмана, $5.67 \cdot 10^{-8}$ $Вт/(м^2 \cdot К^4)$.

Перший член рівняння (2) характеризував тепловий потік, що йшов на нагрів частинки, другий член – тепловий потік всередині частинки. Променевий потік тепла з поверхні частинки врахований у граничній умові (3).

При малих променевих втратах:

$$\frac{\partial T_{Ч}}{\partial t} = k_{\alpha} \cdot (T_{П} - T_{Ч}) \quad (4)$$

де $k_{\alpha} = \frac{6 \cdot \alpha}{\rho_{Ч} \cdot d_{Ч} \cdot C_{PЧ}}$ – безрозмірний коефіцієнт.

Розв'язок рівняння (4) відносно температури частинки $T_{Ч}$ для початкової умови $T_{Ч} \Big|_{t=0} = T_{Ч0}$ при $k_{\alpha} \cdot t < 0.01$ у відповідності з спрощеннями, отримаємо у вигляді:

$$T_{Ч} = T_{П} \cdot k_{\alpha} \cdot t + (1 - k_{\alpha} \cdot t) \cdot T_{Ч0} \quad (5)$$

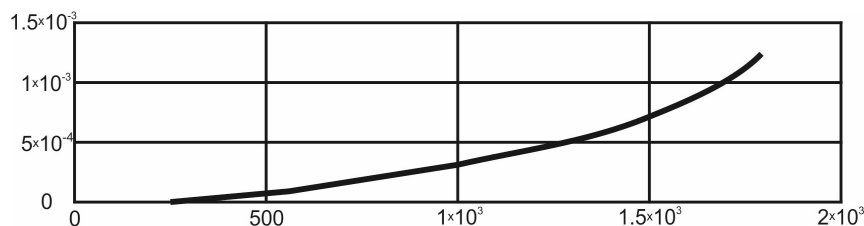


Рис. 3. Залежність часу нагріву від температури до якої необхідно розігріти частинку

В результаті моделювання розраховується теоретичні час та відстань, який долає порошок для нагрівання до заданої температури при відповідній витраті дозуючого пристрою порошку. На рис.3, 4 представлені графічні залежності, які свідчать про те, що при заданій середній температурі плазмового струменя (попередньо задана енергетична характеристика, яка при невиконанні умов наведених нижче уточнюється) для нагрівання частинки до певної температури (вісь абсцис), їй необхідно пролетіти всередині струменя певну відстань (вісь ординат). Швидкість частинки з якою вона пролітає всередині струменя також розраховується моделлю.

В результаті отримуємо розраховану довжину польоту порошку у плазмовому струмені для нагріву до температури $0,9T_{пл}$, при заданих параметрах процесу. Після цього (рис. 7) виконується перевірка умови: $l_{\min} < l_{розрах.} \leq l_{\max}$, якщо умова не виконується здійснюємо корегування заданих в розрахунок середньої температури плазмового струменя у точці входу порошку у потік плазми; якщо умова виконується – відбувається вибір однієї з моделей (статистичних чи математичних), які зв'язують параметри плазмотрону з просторово-енергетичними параметрами плазмового струменя $T_{плазм} = f(d_{сopl.плазм.}, P_{плазм.газу}, I_{дузи}, L)$.

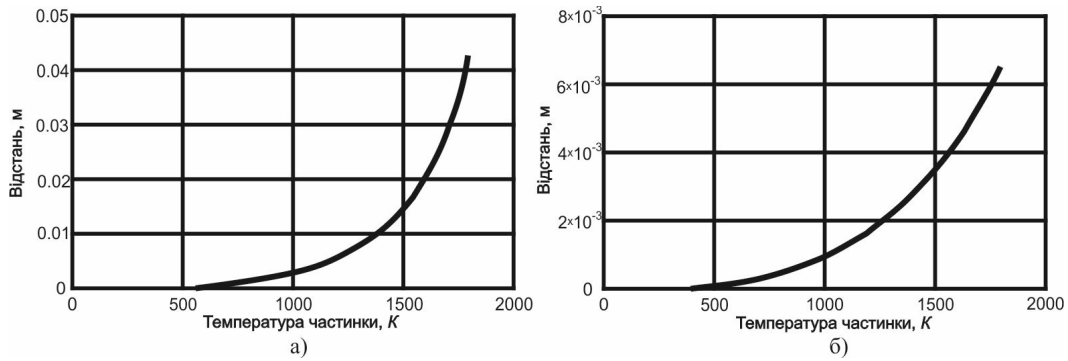


Рис. 4. Залежності відстаней від зрізу сопла до поверхні зразка за умови заданої температури потоку: а – 3000 °К, б – 2000 °К

Для відпрацювання даного алгоритму ми використовували статистичні моделі, які отримали експериментально.

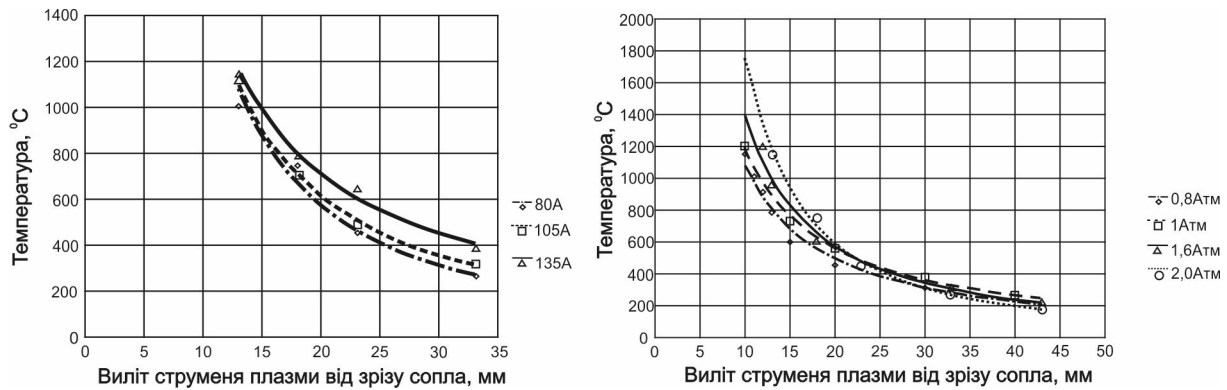


Рис. 5. Графіки залежності температури плазмового струменя: а) від тиску плазмо утворюючого газу, б) від сили струму

Контроль розподілу температур в плазмовому струмені вздовж та поперек потоку плазми здійснювався за допомогою термопар, що розташовувалися на певній відстані від зрізу сопла. В результаті експериментальних досліджень були отримані наступні залежності температури плазмового струменя вздовж потоку від основних параметрів процесу (рис.5,6), що були проранжовані: тиску плазмоутворюючого газу, струму дуги, діаметру сопла плазмотрона. Під час експерименту вплив плазмового струменя на тепловий стан основного матеріалу був мінімальний, нагрів поверхні основного матеріалу не перевищував 200 °С, тобто не відбувалось зміни структурно-фазового складу матеріалу основи.

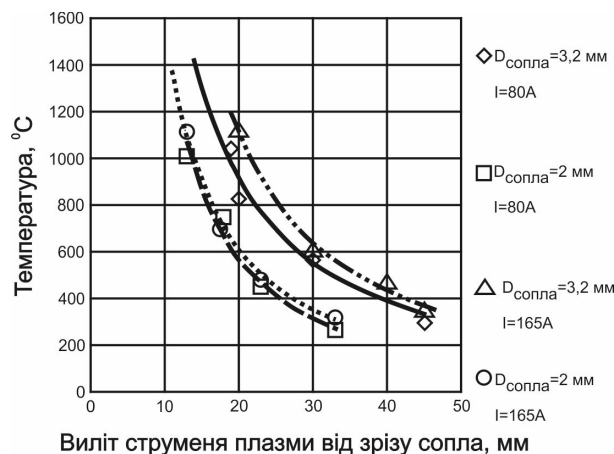


Рис. 6. Графік залежності температури плазмового струменя від діаметра сопла та струму дуги

В результаті досліджень виявилось, що найбільший вплив на ефективну довжину дуги має діаметр сопла плазмотрона, далі за впливом тиск плазмоутворюючого газу і струм дуги.

Згідно алгоритму (рис. 7 початок), за обраною моделлю виконуємо розрахунок розподілу температури по довжині плазмового струменя $T_{\text{плазм}} = f(L)$. Після розрахунку температури струменя вводимо обмеження на максимальну температуру нагріву: $T_{\text{плазм}}(1,2 \cdot l_{\text{розрах.}}) = 0,9 \cdot T_{\text{плавл.}}$ та $T_{\text{плазм}}(l_1) < 0,8 \cdot T_{\text{випар.пор.}}$. За

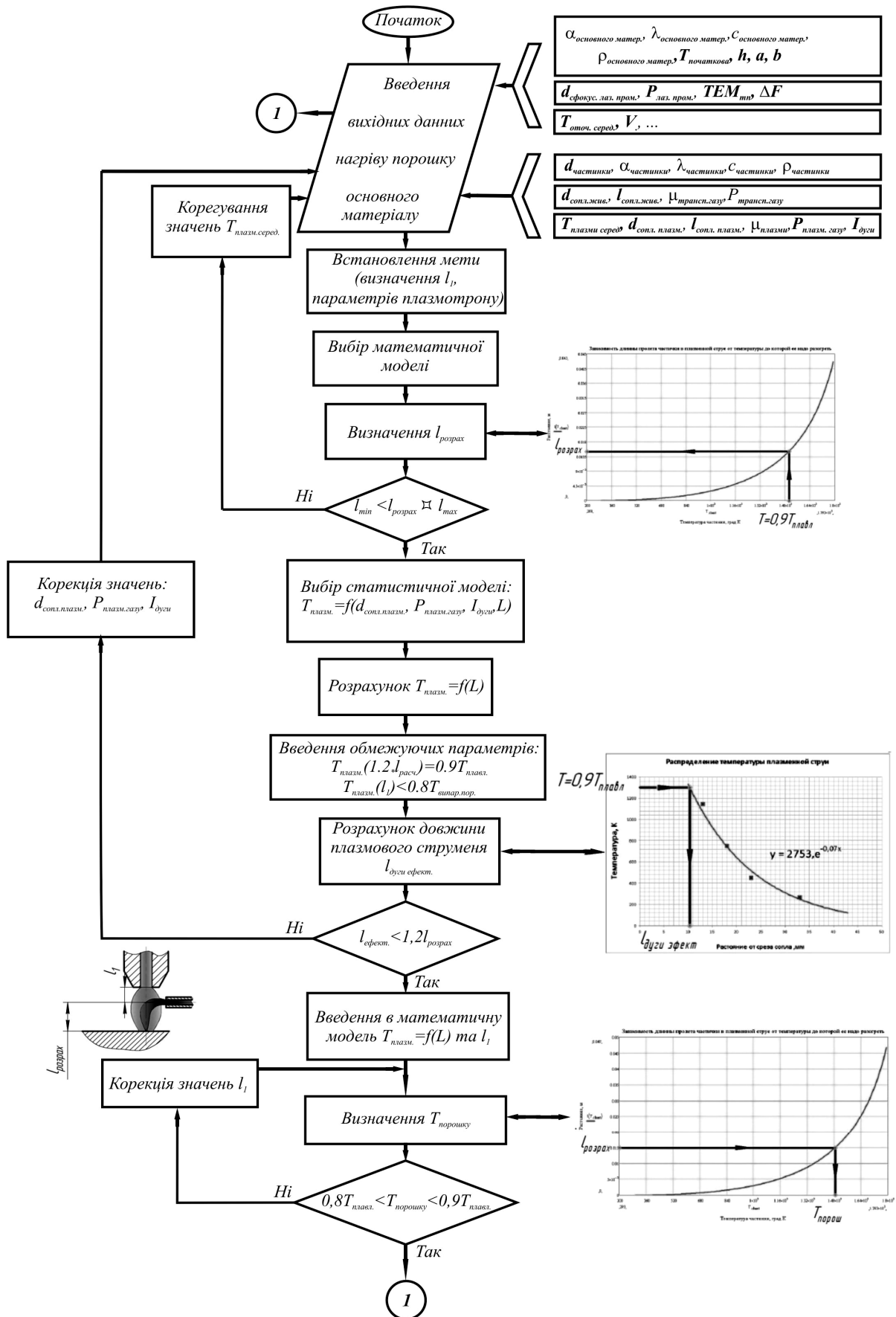


Рис. 7. Загальний алгоритм лазерно-плазмового наплавлення матеріалу (початок)

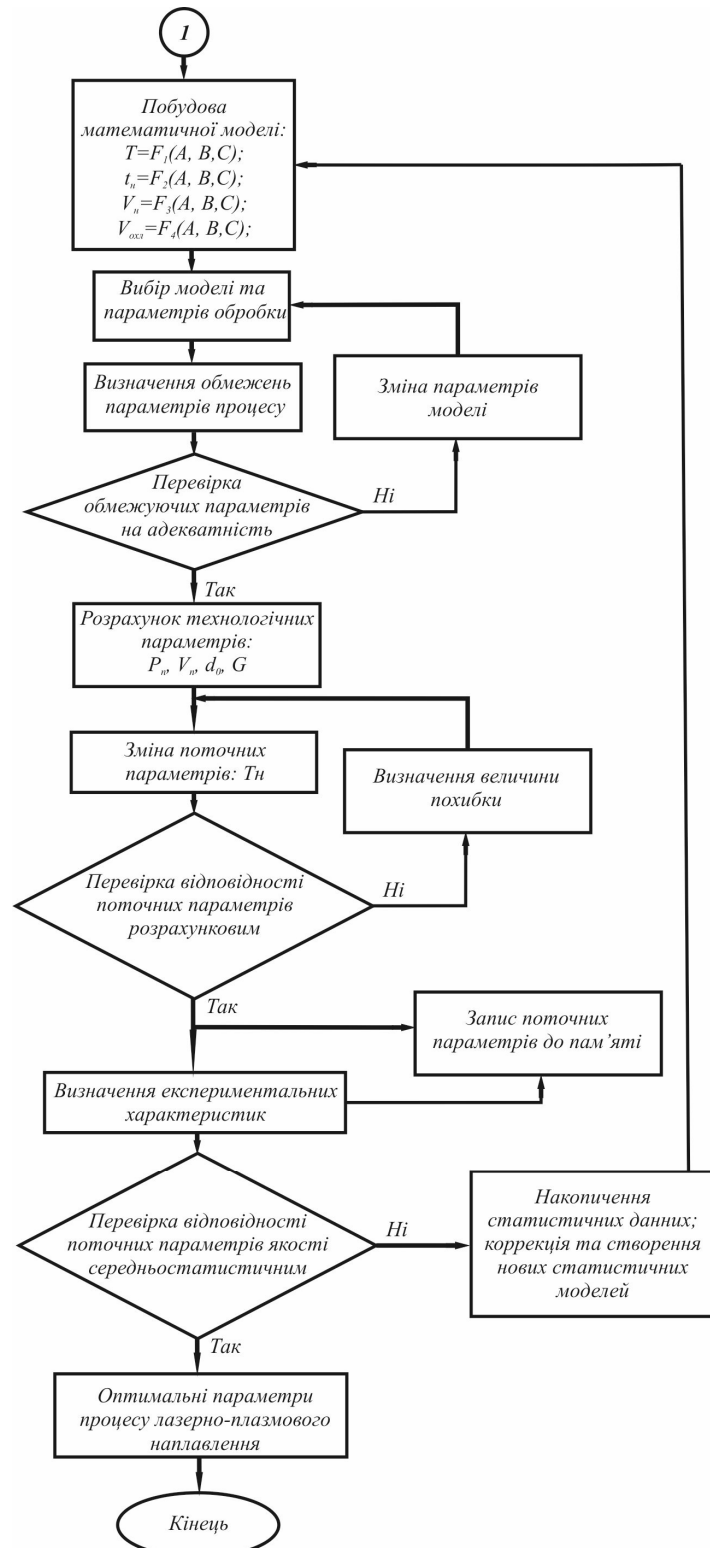


Рис. 7. Загальний алгоритм лазерно-плазмового наплавлення матеріалу (продовження)

скорегованою моделлю виконуємо розрахунок ефективної довжини плазмового струменя, тобто довжини на якій температура плазми більша за $0,9T_{\text{плав}}$ (порошок отримує тепло, а не віддає). Визначаємо чи відповідає розрахована довжина умові: $l_{\text{ефект.}} < 1,2 \cdot l_{\text{розрах.}}$, якщо умова не виконується – корегуємо значення параметрів плазмотрону: $d_{\text{сопл.плазм.}}, P_{\text{плазм.газу}}, I_{\text{дуги}}$ й наново вводимо скореговані параметри нагріву порошку, виконуємо повторно частину алгоритму з розрахунками; якщо умова виконується – вводимо в вибрану спочатку математичну модель отриману залежність температури плазми від довжини $T_{\text{плазм}} = f(L)$ та значення довжини

від розряду на якій необхідно ввести порошок, щоб він нагрівся до заданої температури і не перегрівся I_1 . Визначаємо температуру порошку по заданим значенням процесу. Перевіряємо, чи знаходиться температура порошку у заданих межах: $0,8 \cdot T_{\text{плавл.}} < T_{\text{порошку}} \leq 0,9 \cdot T_{\text{плавл.}}$, якщо умова не виконується корегуємо значення I_1 у математичній моделі, виконуємо розрахунки температури порошку; якщо умова виконується то розрахунки з нагрівом порошкового матеріалу до наперед заданої температури закінчені.

Для реалізації доплавлення попередньо нагрітого плазмовим струменем порошкового матеріалу необхідно провести моделювання лазерного наплавлення, створивши при цьому другу частину загального алгоритму лазерно-плазмового наплавлення матеріалу.

В алгоритмі (рис. 7 продовження) прийнято наступні позначення: *A*- параметри лазерного променя; *B*- характеристики умови опромінення; *C*- характеристики виробу й матеріалу для наплавлення. При введенні значень *A*, *B*, *C* відбувається формування інформаційної бази процесу. Виконуємо побудову математичної моделі процесу наплавлення з використанням всіх введених параметрів.

Вибираємо модель лазерного нагріву з конкретними вихідними параметрами, накладаємо обмеження на параметри процесу. Виконуємо розрахунок значень обмежуючих параметрів, перевіряємо обмежуючі параметри на адекватність. Якщо параметри неадекватні, то виконуємо зміну параметрів моделі, й повертаємось до вибору моделі та відповідно нових параметрів обробки; якщо адекватні – виконуємо розрахунок технологічних параметрів: потужністю лазерного променя *P*, відносна швидкість переміщення *V*, діаметр плями фокусування d_0 , масову витрату порошку *G*. Далі відбувається зміна поточних параметрів.

Виконуємо перевірку відповідності поточних параметрів розрахунковим. Якщо умова не виконується, то визначаємо величину похибки та змінюємо текучі параметри; якщо вона виконується – здійснюємо запис у пам'ять, визначаємо експериментальні характеристики, які так само записуємо у пам'ять. Після цього виконуємо перевірку відповідності поточних параметрів якості середньостатистичним, якщо перевірку параметри не проходять – відбувається накопичення статистичних даних, корекція та створення нових статистичних моделей, після цього повторюється цикл починаючи з побудови математичної моделі; якщо миттєві параметри проходять перевірку – розрахунок по алгоритму закінчується.

Необхідною умовою виконання якісного наплавлення є існування зони підплавлення матеріалу основи для створення металургійного зв'язку. Це реалізується за рахунок високоенергетичного впливу лазерного випромінювання на підготовлену заздалегідь поверхню наплавлення - у момент, або раніше, подачі порошкового матеріалу, що наплавляється, у точку розташовану згідно розрахунків при математичному моделюванні на відповідній відстані від зрізу сопла. При цьому, на поверхні зони наплавлення утворюється розплавлений шар ванни розплаву матеріалу основи, куди потрапляє підігрітий завдяки плазмовому струменю порошковий матеріал. Відбувається спочатку перерозподіл температури у ванні розплаву, температура порошкового матеріалу й ванни розплаву в результаті взаємодії зрівнюються. Далі за рахунок взаємодії ванни розплаву й порошку з лазерним випромінюванням, що має наперед задані геометричні й енергетичні характеристики (довжина хвилі, потужність лазерного випромінювання, діаметр плями фокусування, модовий склад, швидкість переміщення заготовки) відбувається підігрівання до температури плавлення, часткове взаємне перемішування з утворенням наплавленого валуку з відповідними параметрами (ширини, довжини, висоти).

В результаті виконання моделювання згідно розробленого алгоритму отримуємо модель лазерно-плазмового газопорошкового наплавлення, дає можливість отримання оптимальних параметрів процесу лазерно-плазмового наплавлення порошкових матеріалів на поверхню матеріалу основи з наперед заданими розмірами наплавленого шару матеріалу.

Висновки

1. Визначено основні технологічні параметри які впливають на процес нагрівання порошку в плазмовому струмені.

2. Розроблено алгоритм розрахунку оптимальних технологічних параметрів процесу лазерно-плазмового газопорошкового наплавлення, який засновано на визначенні умов нагрівання порошкового матеріалу до наперед заданої температури при проходженні його крізь плазмовий струмінь без зміни властивостей порошкового матеріалу, та відповідним доплавленням лазерним променем охолодженої ванни розплаву за рахунок введення в неї порошкового матеріалу, тим самим створюючи енергозберігаючу та конкурентоздатну технологію.

3. Запропоновано методику, яка дозволяє розраховувати оптимальні режими для отримання за рахунок гібридної лазерно-плазмової технології, наплавлених шарів необхідних розмірів на поверхні заготовки, що в результаті дає можливість зменшити витрати енергії за рахунок використання для підготовчих процесів джерел енергії з більшим ККД ніж у основного джерела, або джерел з меншими витратами енергії.

Список літератури

1. Коваленко В. С., Кривцун І. В. Комбіновані лазерно-дугові процеси обробки матеріалів. Ч. 1. Ефекти комбінованої обробки і способи її реалізації // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2001. - № 5. - С. 33-44.
2. Блоштин М.С., Головка Л.Ф. «Інтенсифікація процесу лазерної обробки використанням енергії електричної дуги», Вестник Национального Технического Университета Украины «Киевский политехнический институт» - Машиностроение Київ: НТУУ «КПІ», 2005, - №47, с.39-42
3. Blostchicin M.S., Golovko L.F., Lukyanenko S.A., Nikitin A.A., Diptan S.Yu., "Technological Mechanisms of Laser-Arc Alloying", The fourth international conference "Laser Technologies in Welding and Materials Processing", 26 May-29May, 2009, vil. Katsiveli, Crimea, Ukraine.
4. Донской А.В., Клубникин В. Г. Электрoплазменные процессы и установки в машиностроении. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979.-221 с. ил.
5. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання / Під редакцією Л.Ф. Головка та С.О. Лук'яненко. – Київ: Вістка, 2009. – 296с.