

8.5 Аналіз науково-дослідних робіт із оплавлення покриттів, нанесених за допомогою різних джерел нагріву

8.5.1 Сучасний стан питання, що вивчається

Довговічність та інші експлуатаційні характеристики деталей машин в значній мірі визначаються фізико-хімічним станом тонких поверхневих шарів. Локалізація зміцнюючих процесів в цих шарах слугує значним резервом підвищення ресурсу деталей при скороченні затрат на виготовлення матеріалів. Одним з найбільш прогресивних напрямків зміцнюючих технологій, є нанесення захисних покриттів з самофлюсуючихся сплавів, які мають високі експлуатаційні якості, при порівняно низькій вартості.

Основні характеристики покриттів при високотемпературному напилюванні (адгезія, когезія, пористість, зносостійкість і ін.) визначаються не тільки вибором матеріалів і розробкою складів покриттів, але й багатьма теплофізичними й технологічними аспектами процесу напилювання.

Незважаючи на певні успіхи, досягнуті в підвищенні якості газотермічних покриттів і, головним чином нанесених за допомогою плазмотронів, газотермічні покриття зберігають основні, властиві їм недоліки [468]. У першу чергу це стосується адгезійної міцності й пористості. І якщо недостатня адгезійна міцність може привести до руйнування покриттів на деталях, що працюють в умовах ударних навантажень, то висока пористість може викликати відшарування будь-якого покриття, тому що у цьому випадку можливе окиснення як самого покриття, так і підложки.

Дослідження поперечного перерізу покриття [468], нанесеного порошком ПГ-ХН80СРЗ методом плазмового напилювання показало, що частина часток приходить на поверхню основи в непроплавленому стані й утримується на ній тільки за рахунок закріплення пластичними частками. Крім того, навіть у повністю розплавлених часток зварені ділянки становлять частину площі контакту "частка-основа" і "частка-частка". Таким чином, формування покриття послідовним укладанням із часток неминуче приводить до появи

мікропорожнеч, особливо на їхніх стиках. Покриття формується в атмосфері, тому мікропорожнини заповнюються газом, що погіршує властивості міжшарових границь, що мають найбільшу насиченість адсорбованими газами. Взаємодія з атмосферою, адсорбція газів і осідання пилоподібних фракцій суттєво погіршують властивості міжшарової зони покриття.

У практиці газотермічного нанесення покриттів широке поширення одержала наступна за напилюванням зміцнююча обробка напиляного шару. У першу чергу дана обробка застосовується для збільшення адгезійної і когезійної міцності покриттів, зниження пористості, вирівнювання мікро- і макроструктури. Відомі кілька методів високотемпературного зміцнення напиляних покриттів: спікання, просочення з термообробкою, пластичне деформування, оплавлення. Найпоширенішим способом зміцнення покриттів є їхнє оплавлення.

Крім ліквідації пористості, видалення окислів, оплавлення покриття веде до значного збільшення взаємної дифузії елементів покриття й основи, що підвищує адгезію й, відповідно, міцність покриття. Якщо в неоплавлених покриттів адгезійна міцність не перевищує $3 \dots 5 \text{ кгс/мм}^2$, то після оплавлення цей показник зростає до $28 \dots 40 \text{ кгс/мм}^2$ і більше. Поряд із цим, при оплавленні на різних режимах можуть змінюватися фізико-механічні властивості покриття внаслідок зміни структури оплавленого сплаву. Таким чином, покриття, отримане напилюванням з наступним оплавленням, на відміну від неоплавленого, здатне витримати значні механічні навантаження: вигин, удар і т.д.

Оплавлення покриттів роблять різними способами, як шляхом нагрівання одночасно всієї оброблюваної поверхні (наприклад, у печах, соляних ваннах), так і за допомогою локального нагрівання концентрованими джерелами енергії (наприклад, оплавлення променем лазера, електронним пучком, електроконтактним нагріванням, електричною дугою, мікроплазмовим джерелом, полум'ям газового пальника, плазмовим струменем).

Оплавлення покриттів у печах можна робити у відновлювальній атмосфері, створюваної газами при згорянні деревного вугілля або аміаком, або в нейтральній атмосфері, для утворення якої використовують водень або азот. Також досить ефективно, з погляду якості покриттів, використання вакуумної печі. За даними, наведеним у роботі [468], зносостійкість покриттів, оплавлених у вакуумній печі, перевищує зносостійкість покриттів, оплавлених за допомогою газового пальника. Найкращі характеристики отримані після термообробки в печі в плинні однієї години при температурі 1303 К (ПГ-ХН80СР2), 1293 К (ПГ-ХН80СР3), 1263 К (СНГН). По даним [468], після термообробки в печі з неокислювальною атмосферою отримане практично безпорісте покриття з адгезійною міцністю, що перевищує 15 кгс/мм². Оплавлення в печах і соляних ваннах є досить технологічним методом, але значний прогрів усієї маси деталі може привести до погіршення структури матеріалу основи. Даний метод має обмеження також по габаритах оброблюваних деталей і, крім того, він не дозволяє робити оплавлення тугоплавких композиційних матеріалів на сталях.

Досить розповсюдженим методом оплавлення є високочастотне індукційне нагрівання [469]. У цьому випадку залежно від геометрії, розмірів індуктора й оброблюваної деталі нагрівання здійснюється або одночасно всієї поверхні, або певних ділянок. Умови проплавлення являють собою відповідне сполучення часу нагрівання, споживаної потужності й форми індуктора. Недоліком індукційного нагрівання є необхідність у кожному окремому випадку виготовляти індуктор відповідно до конфігурації виробу. Крім того, при використанні індукційного нагрівання складно обробляти покриття з тугоплавких з'єднань на немагнітних сплавах.

З погляду фізико-механічних характеристик одержуваного композита “основа-покриття” у цілому, а також з економічних показників процесу найбільш раціональним і ефективним є використання для нагрівання концентрованих джерел енергії, тому що в цьому випадку не відбувається значного розігріву всієї маси оброблюваної деталі.

Оплавлення покриттів пучком електронів, що мають довжину пробігу в матеріалі, що опромінюється, рівну або трохи більшу товщини необхідного шару розплавлювання, дозволяє підвищити щільність потужності в пучку, швидкість і продуктивність оплавлення, а також виключити закипання розплаву й винос його із зони нагрівання. Покриття, одержуване в цьому випадку, має високу однорідність і гарну адгезійну міцність. Оплавлення пучком електронів проводять як у спеціальних вакуумних камерах, так і в атмосферному повітрі. Оплавлення за допомогою електронного пучка дозволяє одержати високі фізико-механічні характеристики напиляних покриттів при збереженні вихідної структури матеріалу основи. Але більшим недоліком даного методу є складність і висока вартість використовуваного встаткування. При цьому робота з електронно-променевими установками вимагає спеціальних заходів щодо захисту обслуговуючого персоналу. Що стосується техніко-економічних показників процесів обробки електронним пучком, то й тут є певні недоліки. У першу чергу, це ставиться до ККД нагрівання поверхні. У роботах, присвячених дослідженню процесів обробки матеріалів електронними пучками, відзначається, що через відбиття електронів від поверхні відношення потужності, поглиненої матеріалом, до вихідної потужності пучка становить для заліза (сталі) 0,25...0,3 і лише для елементів з більшими атомними номерами, наприклад, для вольфраму, досягає 0,5. Таким чином, і в цьому випадку має місце істотна втрата енергії. Також необхідно відзначити, що при використанні електронно-променевих установок виникають проблеми з обробкою деталей зі складною геометрією. Таким чином, у зв'язку з відзначеними вище недоліками, обробка покриттів електронним пучком на практиці застосовується вкрай рідко.

Уникнути перемішування покриття з основою можна при використанні мікроплазмового нагрівання. Процес мікроплазмового оплавлення характеризується незначною зоною термічного впливу (до 300 мкм). При цьому мікроплазмовий струмінь інтенсивно нагріває тільки покриття. Істотним недоліком мікроплазмового нагрівання є його низька продуктивність.

Найпоширенішим способом оплавлення є оплавлення за допомогою ацетілено- кисневих пальників. Нагрівання здійснюють нейтральним полум'ям. Даний спосіб залучає простотою й доступністю встаткування й самої технології. Також відоме застосування як джерело нагрівання плазмового струменя. Ним можна обробляти будь-які матеріали, включаючи тугоплавкі з'єднання.

До недоліків електроконтактного нагрівання слід віднести труднощі обробки деталей зі складною геометрією й неможливість обробки не електропровідних матеріалів. Що стосується зміцнення покриттів просоченням з наступною термообробкою, то в даній технології передбачається об'ємне нагрівання всього виробу, а, отже, мають місце недоліки, властиві оплавленню покриттів у печах.

Недоліки використання для оплавлення дугового зварювання в інертному середовищі й мікроплазмового нагрівання відзначені вище.

З погляду технологічності процесу із застосовуваних методів найбільш раціональний плазмовий спосіб оплавлення. У цьому випадку можлива обробка будь-яких матеріалів і не потрібно додаткове дороге встаткування. Крім того, використання як концентроване джерело енергії плазмового струменя дозволяє в широких межах управляти температурно-тимчасовими параметрами процесу обробки напиляних покриттів. А можливість використання в якості плазмоутворюючого середовища недорогих і недефіцитних газів, аж до повітря, робить цей метод особливо привабливим.

До основних недоліків плазмових покриттів слід віднести їхню низьку адгезійну міцність і високу пористість. Однієї із причин, що приводять до зазначених недоліків, є те, що температура й швидкість струменів плазми розподілені по перетину нерівномірно, внаслідок чого частки, що приходять на поверхню, мають різні значення температури й швидкості. Також істотним недоліком плазмоструйного нагрівання є те, що існуючі напилювальні плазмотрони мають високу швидкість витікання плазмового струменя (розраховані на роботу в турбулентному режимі). Таким чином, при роботі на малій дистанції через високий тиск плазмового струменя на напиляну поверхню

може відбуватися порушення шару покриття, при збільшенні дистанції дуже складно прогріти оброблювану поверхню, тому що в напилювальних плазмотронів через високий рівень турбулентності на зрізі вихідного електрода довжина високоенергетичної зони струменя плазми невелика.

У зв'язку із цим, представляється перспективним оплавлення покриттів концентрованим лазерним випромінюванням, що не створює тиск на оброблювану поверхню, для зниження пористості й різнотовщинності нанесених шарів з одночасним підвищенням рівня сплавлення порошкових матеріалів з метою збільшення терміну служби й безаварійної роботи плазменно-напиляних виробів.

8.5.2 Аналіз робіт з оплавлення зносостійких покриттів лазерним випромінюванням

Традиційна технологія одержання покриттів з порошкових сплавів, що самофлюсуються передбачає їх напилювання на зміцнювану поверхню, оплавлення шляхом нагріву до температури, що відповідає інтервалу кристалізації даного сплаву (1000...1200 °C), та послідуєчого повільного остигання. Однак, використання неконцентрованих джерел нагріву при оплавленні покриттів завжди призводить до виникнення ряду негативних явищ: об'ємному розігріву зміцнюваних деталей до високих температур; посиленню процесів відпуску та рекристалізації; розміцненню матеріалу основи та значним температурним деформаціям. Все це суттєво звужує область використання даної технології та примушує шукати нові методи оплавлення покриттів. Одним з яких є використання джерел концентрованої енергії, а саме потужних технологічних лазерів.

Процес лазерної обробки є ефективним методом термічної обробки, і володіє наступною низкою переваг, в порівнянні з вищепереліченими процесами:

- високі густини потужності лазерного випромінювання, істотно перевищуючі інші джерела енергії, дозволяють значно збільшити продуктивність процесу;
- висока концентрація енергії, що підводиться, і локальність процесу, дозволяють проводити обробку тільки поверхневої ділянки матеріалу без нагріву решти об'єму і порушення його структури і властивостей;
- відсутність деформацій, поводок і викривлення деталей після обробки;
- можливість управляти структурою і властивостями отриманих поверхневих шарів, змінюючи параметри лазерної обробки;
- відсутність механічних зусиль на оброблюваний матеріал дає можливість обробляти крихкі і ажурні вироби;
- можливість обробки на повітрі;
- добра відтворність результатів обробки;
- простота автоматизації процесу і ін.

Необхідність дослідження процесів оплавлення покриттів лазерним випромінюванням з різними довжинами хвиль викликана наступними факторами:

1. У промисловості існує необхідність нанесення покриттів при виготовленні деталей з різних металів та сплавів.

2. Крім того, існує гостра проблема відновлення і зміцнення деталей різних форм і розмірів (як циліндричних так і плоских) і також нанесення покриттів у вигляді тонких доріжок й малих плям.

3. Традиційні методи газотермічного нанесення покриттів, мають ряд недоліків, обумовлених специфікою фазо- та структуроутворення матеріалів при напилюванні (пороутворення, мала міцність зчеплення покриття з основою, значна шорсткість після напилювання, нерівномірність по товщині, хімічна та структурна неоднорідність, потреба у подальшій механічній обробці тощо). В зв'язку з цим існує потреба в подальшому оплавленні покриттів з метою

усунення наведених недоліків. Одним з перспективних шляхів істотного поліпшення фізико-механічних властивостей та експлуатаційних характеристик покриттів є оплавлення за допомогою лазерного випромінювання.

4. Інтерес викликає оплавлення лазерним випромінюванням з різними довжинами хвиль покриттів з самофлюсуючихся сплавів, які мають високу зносостійкість, корозійну стійкість, стійкість до активних хімічних середовищ й покриттів, які працюють у складних умовах з ударними навантаженнями (приклад – розподільчі та колінчаті вали двигунів внутрішнього згорання, елементи ходової частини залізничного та автомобільного транспорту, деталі бурового і нафтоздобуваючого обладнання, плунжерні вузли).

Лазерне оплавлення напиляних покриттів було запропоновано з метою підвищення міцностних якостей напиляних покриттів, шляхом усунення макродефектності структури як усього покриття, так й контактної зони між покриттям та основою [470-472]. Встановлено, що лазерна обробка покриттів зменшує кількість пор і окислів, суттєво збільшує адгезійну міцність покриттів. За рахунок зміни параметрів променя може регулюватися глибина проплавлення шару, вона може бути дорівнює товщині попередньо нанесеного шару, може перевершувати її й розплавляти частину основи. Висока швидкість нагрівання при лазерному оплавленні дозволяє зберігати вихідну (у тому числі дрібнозернисту) структуру матеріалу покриття.

Однак, наведені у роботах [470-476] дані по структурі, фазовому складу та мікротвердості навіть для одного типу самофлюсуючогося порошку не співпадають, та навіть протиречуть один одному. Так в роботі [470] спостерігається структура нікелевої матриці з дисперсною та рівномірною структурою. Дендрити являють собою γ -твердий розчин нікелю, а між гілками дендритів γ -твердого розчину кристалізується тонкоразгалужена бори дна евтектика. В роботі [471], навпаки, підкреслюється неоднорідність структури, пов'язана з різними термічними режимами кристалізації, які мають місце в ванні розплаву, яку утворює лазерний промінь, та описуються три характерні зони, які відрізняються формою, структурою та розмірами карбідних включень.

Мілкокристалічна неоднорідна структура, обумовлена перемішуванням, з різними по формі та розподілу зміцнюючи ми фазами описана в роботі [473].

При аналізі фазового складу рентгеноструктурними методами, основна фазова складова досліджуваних покриттів - γ -твердий розчин нікелю – ідентифікується в усіх роботах. А от що стосується інших фаз, то в літературі наведені дуже відрізняючися дані о їх якісному та кількісному складі. Наприклад, у роботі [470] підкреслюється, наявність в основному боридів нікелю Ni_3B , хрому, та карбідів хрому Cr_7C_3 та Cr_3C_2 . В роботі [471] після лазерного оплавлення покриття виявлено наявність лише Ni_2B , в якості другої фази відмічений Ni_3B . Проведений в [473] аналіз дозволив надійно ідентифікувати такі фази як $Cr_{23}C_6$, Cr_3C_2 та CrB .

Пов'язуючи значення мікротвердості зі ступенем пересиченості γ -твердого розчину, автори робіт [470-471] роблять протилежні висновки, порівнюючи мікротвердість покриттів оплавлених лазером та газовим полум'ям.

Така невизначеність структурного та фазового складу призводить до протилежних висновків по відношенню до механізмів формування та мікротвердості оплавлених лазерним випромінюванням покриттів.

Роботи, пов'язані з дослідженням впливу довжини хвилі лазерного випромінювання на параметри оплавлення самофлюсуючихся покриттів не були виявлені.

Структурні дослідження, уточнення фазового складу та оцінка механічних характеристик покриттів з самофлюсуючихся сплавів, оплавлених лазерним випромінюванням, залишаються актуальною науковою проблемою, як з точки зору більш надійного прогнозування експлуатаційних характеристик покриттів, так й з ціллю більш глибокого поняття фундаментальних процесів, що відбуваються в зоні дії лазерного випромінювання.

Технологія оплавлення покриттів лазерним випромінюванням з різними довжинами хвиль забезпечує широкі можливості отримання поверхневих шарів металу із необхідною структурою. Це створює принципові передумови для

формування покриттів із заданими службовими характеристиками. Дослідження, проведені по даному напрямку, до теперішнього часу носили епізодичний характер і не дозволяли вирішити проблему створення технологічних процесів лазерного оплавлення покриттів. З цієї точки зору важливим є вивчення теплових умов формування таких поверхневих шарів при лазерній обробці, визначення оптимальних режимів оплавлення покриттів, що забезпечують необхідну структуру і властивості виробів. Це дозволить визначити нові перспективні області застосування даних процесів.

На підставі вищевикладеного матеріалу, можна зробити наступні висновки:

- аналіз робіт, виконаних в цій області, показує, що дані праць різних авторів по структурі, фазовому складу та мікротвердості навіть для одного типу самофлюсуючого порошку не співпадають, та навіть протиречуть один одному;

- мало вивчені можливості застосування цієї технології для отримання поверхневих шарів на робочих поверхнях деталей з високими триботехнічними і механічними характеристиками;

- дотепер не визначений набір оптимальних технологічних режимів оплавлення покриттів лазерним випромінюванням з різними довжинами хвиль, при яких формується структура з підвищеними експлуатаційними характеристиками зносостійкості, корозійної стійкості, твердості.