

Аналіз напруженого стану поверхневих шарів, отриманих електромагнітним наплавленням

ХНТУСГ ім. П. Василенка

Постановка проблеми. Існує велика кількість методів відновлення деталей машин і механізмів [1]. З їх аналізу випливає, що відновлення зношених поверхонь не завжди забезпечує виконання ряду важливих вимог. Практично всі методи, крім зварювання і наплавлення, не дають надійного зчеплення нанесеного шару з основним металом, утворюють шари з низькими механічними властивостями, вимагають ретельної підготовки поверхні деталі, трудомісткі і мають низьку продуктивність, не завжди забезпечують задану товщину нанесеного шару [1].

Аналіз публікацій. Проведений аналіз показує [1], що в даний час найбільш універсальним, надійним і часто єдино прийнятним способом відновлення є наплавлення. Одним із перспективних методів наплавлення при відновленні деталей машин і механізмів є електромагнітне [2].

Суть методу зміцнення полягає в розплавленні зерен феромагнітного порошку імпульсами електричних розрядів і полярному перенесенні крапель розплаву на відновлювану або зміцнювану поверхню в постійному магнітному полі. Формування зміцненого шару забезпечується шляхом хаотичного розташування на поверхні деталі точкових вкраплень. Протягом процесу утворення покриття відбувається збільшення його суцільності, а товщина практично не змінюється, хоча перенесення матеріалу порошку продовжується. При цьому згладжується поверхня, що зміцнюється [2].

Крім наплавлення відбувається дифузійне легування поверхні деталі і на ній утворюється шар, який має високі фізико-механічні властивості: твердість, зносостійкість, міцність, хімічну стійкість. Одночасно з цим через швидке відведення тепла всередину основного матеріалу створюються умови для загартування поверхневого шару [3].

На якість покриття впливають такі основні технологічні фактори: сила технологічного струму; величина магнітної індукції в робочому зазорі; розмір частинок феромагнітного порошку; витрата і швидкість подачі порошку в зазор; швидкість обертання деталі; швидкість подачі полюсного наконечника.

Електромагнітне наплавлення має ряд особливостей і переваг:

– для реалізації способу використовують малогабаритне і просте в обслуговуванні устаткування, процес одержання покриттів легко механізується й автоматизується;

– поверхня деталі не вимагає спеціальної підготовки перед зміцненням;

– створений поверхневий шар має високу міцність зчеплення з матеріалом;

– змінюючи хімічний склад зміцнюючого феропорошку, можна створити поверхневий шар із заданими фізико-механічними властивостями;

– процес має високу продуктивність (200 см²/хв).

Незважаючи на наведені вище переваги, електромагнітне наплавлення має ряд недоліків і специфічних особливостей [2, 4]:

- застосування магнітних матеріалів як порошоків, що наплавляються;

- кристалізація рідкого металу, яка відбувається в умовах перегрівання й інтенсивного тепловідведення в основний метал;
- нерівномірний розподіл температури по об'єму металу;
- перемішування (дифузія) матеріалу, що наноситься, з основним металом виробу;
- швидке проходження хімічних і термічних реакцій;
- часткове вигоряння окремих елементів розплаву;
- високі швидкості охолодження розплаву.

Внаслідок значних швидкостей охолодження наплавленого металу і, як наслідок, незначних швидкостей проходження дифузії, склад розплаву повністю не вирівнюється. Це призводить до нерівномірного розподілу компонентів по перерізу затвердіваючого сплаву й утворення нерівноважних станів, тобто до інтенсивного розвитку ліквацийних процесів [4].

В умовах нерівномірної кристалізації в наплавлених шарах разом з хімічною неоднорідністю розвивається фізична неоднорідність, пов'язана з локальним скупченням недосконалостей кристалічних ґрат, у першу чергу вакансій і дислокацій [4].

Високі швидкості охолодження наплавленого металу викликають появу значних термічних розтяжних напружень у поверхневому та підповерхневому шарах. Такі напруження сприяють розвитку втомних процесів [5] і знижують зносостійкість робочих поверхонь [6].

З усього цього впливає, що стан поверхневого шару матеріалу, а саме величина і знак поверхневих напружень, можуть мати визначальний вплив на експлуатаційні властивості об'єкта (зносостійкість і витривалість). Тому задача оцінки напруженого стану поверхневих шарів тертьових матеріалів є дуже актуальною.

Постановка завдання. Метою даної роботи є проведення порівняльної оцінки залишкових поверхневих макронапружень на зразках, отриманих при різних режимах наплавлення, і пояснення з цього погляду зміни їх експлуатаційних властивостей.

Основний матеріал. З метою виявлення впливу режиму наплавлення на залишкові напруження, а також для порівняння результатів були проведені порівняльні дослідження двох видів зразків: наплавка при кімнатній температурі на сталь 45 ДСТУ 1050 – 94 (1-а серія); наплавка на підігріту підкладку зі сталі 45 ДСТУ 1050 – 94 (2-а серія).

Рівень залишкових термічних макронапружень визначали рентгенівським методом багаторазових похилих зйомок на дифрактометрі “ДРОН-3” у фільтрованому Сг-випромінюванні з потоковою реєстрацією профілю дифракційної лінії (211)*. Точність отриманих значень була не гірше ± 50 МПа. Враховуючи малу глибину проникнення рентгенівських променів, досліджувану поверхню можна розглядати як оболонку, в якій діють два головних напруження – σ_1 і σ_2 і три компоненти деформацій – ε_1 , ε_2 і ε_3 . Компонента ε_3 виникає в напрямку нормалі до поверхні (ε_{\perp}) внаслідок поперечної деформації. У пружно-ізотропному наближенні компоненту нормальних напружень σ_x у будь-якому напрямку X , що лежить у досліджуваній поверхні, можна визначити зі співвідношення

* Дослідження виконано проф. В.В. Білозеровим і Г.І. Махатіловою, НТУ “ХПІ”

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \left(\frac{1+\mu}{E} \right) \sin^2 \psi \sigma_x + \varepsilon_{\perp}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_{\varphi\psi}$ – відносна деформація в напрямку, що лежить у площині, яка проходить через напрямок X і нормаль до головної площини й утворює кут ψ з цією нормаллю (азимутальний кут φ однаковий);

E – модуль пружності;

μ – коефіцієнт Пуассона.

Рівняння (1) є основним співвідношенням методу похилих зйомок ($\sin^2 \psi$ – методу) при двовісному напруженому стані. Із залежності $\varepsilon_{\varphi\psi}$ від $\sin^2 \psi$ ($\sin^2 \psi$ – графіка) визначають окремі компоненти напружень і суму головних напружень ($\sigma_1 + \sigma_2$). Проводять декілька похилих зйомок під різними кутами ψ при незмінному куті φ і будують $\sin^2 \psi$ – графік. Він являє собою пряму, якщо виконуються такі допущення: головні напруження еліпсоїда деформації збігаються з осями координат об'єкта; у межах відбиваючого шару не виявляються градієнти напружень і складу. По куту α нахилу графіка, знаючи E і μ , визначають σ_x .

$$\operatorname{tg} \alpha = \left(\frac{1+\mu}{E} \right) \sigma_x, \quad (2)$$

де α – кут нахилу $\sin^2 \psi$ – графіка.

$$\varepsilon_{\perp} = - \left(\frac{\mu}{E} \right) (\sigma_1 + \sigma_2); \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_{\varphi,\psi=0} = \frac{d_{\perp} + d_0}{d_0}, \quad (4)$$

де d_0 – міжплощинна відстань, що відповідає ненапруженому станові, вибраної сім'ї площин;

d_{\perp} – міжплощинна відстань, виміряна в напрямку нормалі до поверхні [7].

Виникнення внутрішніх напружень у процесі утворення структури супроводжується ростом коерцитивної сили (H_C). Її величина характеризує градієнт розподілу залишкових напружень по межах розподілу упорядкованих і неупорядкованих фаз. Збільшення градієнта сприяє утворенню зон концентрації напружень, а такі зони можуть бути причинами зародження початкових руйнувань (мікротріщин) по межах розподілу фаз [8]. Зростання коерцитивної сили свідчить про більш рівномірний розподіл внутрішніх напружень між структурними елементами поверхневого шару, що виключає можливість появи мікродефектів між об'ємами з різним рівнем внутрішніх макронапружень. Для порівняльної оцінки рівня коерцитивної сили використовували коерцитиметр КРМ - Ц.

Для оцінки рівня напружено-деформованого стану зразків, отриманих при різних режимах наплавлення, зробили вимірювання коерцитивної сили і залишкових напружень. Результати досліджень представлені в таблиці.

Встановлено, що в поверхневому шарі після наплавлення при кімнатній температурі виникають розтяжні залишкові напруження, а при наплавленні на підігріту підкладку змінюється не тільки величина, але і знак залишкових напружень.

Результати вимірювання мікротвердості, залишкових напружень і коерцитивної сили

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Мікротвердість $H_\mu, \text{МПа}$	Напруження $\sigma, \text{МПа}$	Коерцитивна сила $H_c, \text{А/см}$
20	11200	420	19,4
250	9600	-240	28,1

Внутрішні залишкові напруження в поверхневому шарі після наплавлення можуть складатися з термічних напружень, що виникають через градієнт температур і структурних напружень, які виникають при структурних перетвореннях і викликають об'ємні зміни. При різних режимах наплавлення внутрішні залишкові напруження, викликані дією одного фактора, можуть превалювати над напруженнями, викликаними дією іншого фактора.

Виникнення розтяжних залишкових напружень у зміцненому шарі після наплавлення викликається тим, що в зоні контакту розплавлених крапель порошку відбувається миттєве нагрівання поверхневого шару деталі до високих температур, аж до оплавлення, що викликає збільшення їхнього об'єму. Після цього відбувається миттєве охолодження металу поверхневого шару, яке супроводжується його стискуванням, чому перешкоджають холодні шари металу, що лежать внизу. В результаті в поверхневих шарах розвиваються розтяжні залишкові напруження.

Крім нагрівання і перенесення на поверхню розплаву порошку й утворення покриття відбувається збагачення поверхневих шарів легуючими елементами матеріалу порошку і навколишнього середовища, що приводить до утворення складних хімічних сполук. Крім того, у поверхневому шарі утворюються гартівні структури, а формування зміцненого шару супроводжується структурними перетвореннями, які пов'язані з об'ємними змінами.

Розглядаючи механізм виникнення розтяжних залишкових напружень, необхідно відзначити, що при електромагнітному наплавленні градієнт температур по перерізу зміцненого шару дуже великий і тому напруження досягають значної величини (див. таблицю).

Виникнення стискаючих залишкових напружень у зміцненому шарі у першу чергу пов'язано зі збільшенням питомого об'єму металу внаслідок одержання безпористої структури покриття, а також структурними перетвореннями і дифузійними процесами, що відбуваються через менший градієнт температур при наплавленні на підігрітий зразок.

Виникнення внутрішніх напружень у процесі формування структури супроводжується зміною коерцитивної сили. Так, при утворенні дрібнодисперсної структури коерцитивна сила зростає, а утворення укрупнених зерен і субблоків структури пов'язано зі зменшенням коерцитивної сили. Саме такий результат спостерігаємо при утворенні структури в зміцненому шарі при різних режимах наплавлення. При наплавленні на підігрітий зразок одержуємо зміцнений шар з

більш дрібнодисперсною і упорядкованою структурою, що підтверджується ростом коерцитивної сили на 31%.

Величина коерцитивної сили характеризує градієнт розподілу залишкових напружень по межах розподілу упорядкованих і неупорядкованих фаз. Збільшення градієнта напружень по межах розподілу сприяє утворенню зон концентрації напруг, а такі зони можуть бути місцями зародження початкових руйнувань. Це відіграє велику роль при зносному та втомному руйнуванні. Ріст коерцитивної сили свідчить про більш рівномірний розподіл внутрішніх напружень між структурними елементами зміцненого шару, що виключає можливість появи мікродефектів між об'ємами з різним рівнем внутрішніх напружень.

Висновки. 1. Підводячи підсумки аналізу наявних у літературі експериментальних даних, можна стверджувати, що однією з головних особливостей відновлюваного наплавлення зношених деталей є структура і властивості, які спостерігаються після наплавлення, як у наплавленому металі, так і в різних ділянках основного металу. Це разом із залишковими напруженнями за певних умов експлуатації може впливати на експлуатаційні властивості і конструкційну міцність усього відновлюваного виробу.

2. Вплив швидкості охолодження на формування структури і величину залишкових напруг є визначальним чинником як на ділянці переходу від основного матеріалу до покриття, що формується з розплаву, так і в покритті.

3. Дослідження рівня напружено-деформованого стану зразків, отриманих при різних режимах наплавлення, показало, що в зразках, отриманих при кімнатній температурі, виникають великі розтяжні залишкові напруження, а наплавлення на підігрітий зразок зменшує не тільки величину напруження, але й їхній знак. Виникнення стискаючих залишкових напружень сприятливо позначається на зносостійкості й витривалості досліджуваних покриттів. Збільшення коерцитивної сили свідчить про утворення упорядкованої дрібнодисперсної структури з рівномірним розподілом внутрішніх напружень між структурними складовими.

Список літератури

1. Молодык Н.В., Зенкин А.С. Восстановление деталей машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 480 с.
2. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П.И. Ящерицин, М.Т. Забавский, Л.М. Кожуро и др. / Под ред. П.И. Ящерицина. - Минск: Наука и техника, 1988. – 271 с.
3. Поляков В.Н. Поверхностное упрочнение деталей ферромагнитными порошками в магнитном поле // Вестник машиностроения. - 1973.- № 7.- С. 52 - 53.
4. Исследование структуры и фазового состава упрочненных электромагнитных покрытий / Л.Р. Дудецкая, Г.Б. Ярошевич, Ю.Г. Орлов и др. // Защитные покрытия на металлах. - 1994. - Вып. 28. - С. 63 - 66.
5. Дехтярь Л.И., Игнатьков Д.А., Андрейчук В.К. Выносливость валов с покрытиями. – Кишинев: ШТИИНЦА, 1983. – 175 с.
6. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техника, 1970. – 263 с.
7. Белозеров В.В., Махатилова Г.И. Рентгенографическое определение макронапряжений: Метод. пособие к лабораторной работе. – Х.: НТУ “ХПИ”, 1995. – 10 с.
8. Гиндин А.В. Неклюдов В.С. Физика программного упрочнения. – К.: Наук. думка, 1979. – 183 с.