

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ НАПИЛЕННЯ ЧИСТОВОГО ПОКРИТТЯ

Робота присвячена детонаційному напиленню. Наведено аналіз взаємодії двофазного потоку, який транспортується детонаційною хвилею, з підкладкою. Розглянуто можливість нанесення на циліндричну поверхню вала покриття, яке не потребує механічної обробки з метою відновлення форми і розміру виробу.

Стан проблеми. До ефективних засобів підвищення надійності й довговічності конструкційних матеріалів для деталей машин, устаткування, технологічного й інструментального забезпечення належать методи поверхневої обробки. Найпоширенішим видом поверхневого зміцнення є створення різних покриттів. Однією з нових технологій, що забезпечує можливість модифікації поверхонь конструкційних матеріалів, нанесення на них покриттів із захисними й іншими функціями, є детонаційне напилення. Детонаційна технологія базується на з'єднанні гранул (частинок порошку), що транспортуються детонаційною хвилею, при ударі з підкладкою.

У сучасних важких умовах, які переживає народне господарство України, проблема терміну служби деталей машин і агрегатів, їхньої довговічності й надійності має досить велике значення. Складності полягають у тому, що майже все устаткування промислових підприємств повністю зношене, а придбання нового для його заміни – непосильне завдання для більшості заводів. У зв'язку з цим пошук технологій, що забезпечують збільшення терміну служби деталей і машин, стає першорядним науковим завданням. Найбільшу цінність при цьому складає технологія, яка використовувала б мінімальну кількість обладнання. Класичний процес створення детонаційного як одного з видів газотермічного покриття на деталях включає в себе як безпосередньо напилення, так і механічну обробку покриття. Особливо це стосується валів.

Аналіз досліджень і публікацій. У промисловості найбільше поширення отримали газотермічні покриття [1]: газоплазмові, плазмові та детонаційні. Серед них найкращі технічні характеристики – максимальна зносостійкість і адгезія до підкладок, мінімальна пористість і газопроникність – притаманні детонаційним покриттям [2]. Розробка методу їх нанесення розпочалась із кінця 60-х років минулого століття [3]. За пройдений час знайдено багато матеріалів, що можна наносити, та створені для цього технології. Паралельно з розвитком цих технологій досліджувалась детонаційна хвиля [4] і процеси в потоці, який розглядається як такий, що включає тверду і газоподібну фази (іноді плазму) [5]. Однак у літературі мало висвітлюється питання взаємодії потоку з підкладкою, а саме такі дослідження потрібні для розроблення технології чистового напилення. Під чистовим напиленням розуміємо таке покриття, яке не потребує додаткової механічної обробки, крім полірування при необхідності.

Більшість авторів свої дослідження процесів у детонаційній установці спрямовують на покращення адгезії та когезії, зносостійкості та корозостійкості покриття, керування його пористістю та твердістю, однак їхні роботи не розглядають механічної обробки отриманого покриття. У науковій і технічній літературі окремо описується технологія нанесення детонаційного покриття і механічної обробки після напилення [1, 6].

Постановка завдання. Детонаційне покриття, як і інше газотермічне, частіше за все є дуже твердим і вимагає механічної обробки. Після напилення виріб не має достатньої точності, а сама поверхня виходить нерівною і відносно шорсткою. При напиленні зазвичай роблять припуск на наступну механічну обробку, яка виконується різанням або шліфуванням. Вибрати оптимальний припуск – це перше завдання, яке має вирішуватись перед нанесенням покриття на конкретний виріб. Інше завдання – це розробка технології механічної обробки після напилення. На даний час немає точних або загальноприйнятих даних щодо швидкості різання, геометрії різального інструмента та інших параметрах обробки покриттів різанням, якими необхідно користуватися для тонких (до 1 мм) покриттів. Завдання отримання якісної поверхні при шліфуванні потребує старанного вибору абразивних інструментів і режиму шліфування. Ці досить складні технологічні завдання саме детонаційний спосіб нанесення покриття дає можливість обійти при формуванні чистового покриття.

Перед нами виникає завдання – розробити методику розрахунку напилення покриття заданої товщини із неоднорідного в часі потоку, але такого, що може відтворюватись у потрібний момент часу. Оскільки детонаційна хвиля здійснює напилення гранульованої речовини, то існує необхідність у синхронізації обертання підкладки (вала) з утворенням детонаційної хвилі та процесом напилення.

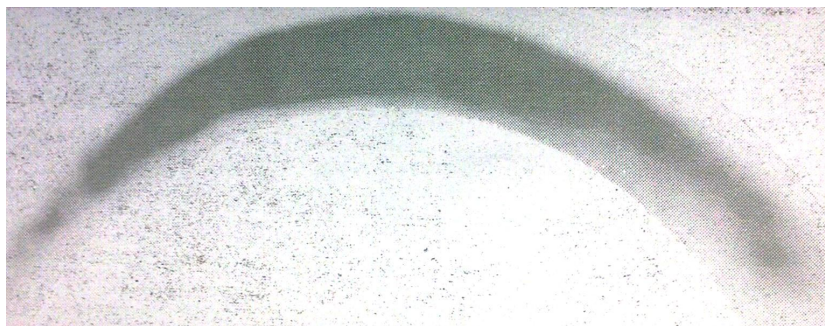
Основні наукові результати. Запалювання детонаційної хвилі може бути синхронізовано з кутом повороту виробу. Це є основою для створення технології напилення, при якій покриття буде мати задану товщину по всій поверхні. У досліді синхронізацію моменту запалювання детонаційної суміші і кута

повороту підкладки, якою була циліндрична поверхня вала, ми здійснювали за допомогою вузького екрану (тонкої металевої смужки), що кріпився вздовж радіуса на валу, який обертався. Для рівномірного нанесення покриття необхідно, щоб швидкість обертання підкладки була незмінною. Оптична система для визначення повороту вала включає світлодіод, який випромінює промінь інфрачервоного світла, та фотодіод, який його сприймає. Непрозорий екран був виготовлений із жерсті, бо повинен мати достатню жорсткість, щоб при великих обертах не зміщуватися і не деформуватися. Для цього на екрані вздовж напрямку променя роблять ребра жорсткості.

Зміна положення підкладки (кута повороту) в момент попадання на неї речовини, яка напилюється, здійснюється лінією затримки сигналу. У момент перекривання екраном інфрачервоного променя в слідуючій оптичній системі формується прямокутний імпульс напруги. Він вмикає електронне реле часу, яке змінює момент запалювання детонаційної хвилі, із затримкою, запускаючи імпульс високої напруги. Між електродами свічки, які розміщені в камері запалювання, відбувається іскровий розряд. Поки детонаційна установка буде підготовлюватись до наступного пострілу, реле часу має бути виставлене на потрібну затримку, яка відповідає розрахованому куту повороту підкладки.

Були проведені дослідження для створення теоретичної бази розрахунків повороту підкладки на потрібні кути для рівномірного (чистового) нанесення покриття при детонаційному напиленні. У наших роботах [7, 8] описані установка і методика визначення швидкості частинок у двофазному потоці при детонаційному напиленні. Визначення швидкості твердої фази в потоці відбувалось за її напиленням на диск, який обертався з відомою швидкістю на відстані, яка відраховувалась від ствола детонаційної установки (дистанції напилення). Синхронізація запалювання газової суміші відбувалась із обертанням диска.

Після пострілу на диску, який обертається зі швидкістю v_ϕ , формується слід із напиленого матеріалу у вигляді смуги (рис. 1).



*Рис. 1. Слід після пострілу детонаційної установки.
Диск обертається проти годинникової стрілки*

За довжиною смуги напилення l знаходимо час формування покриття:

$$t_\phi = \frac{l}{v_\phi} \quad (1)$$

При одноразовому напиленні можна визначити час формування покриття. Проте через невелику концентрацію частинок на початку і в кінці двофазного потоку похибка може сягати 50 %. Для підвищення точності виконують декілька пострілів за тих самих умов. Синхронізація обертання диска і моменту запалювання детонаційної хвилі дає змогу відтворити умови.

Багато важливої інформації можна отримати і при одноразовому пострілі. Наприклад розподіл частинок у часі для двофазного потоку. Поверхня диску покривалась м'яким матеріалом, щоб тверді частинки не зазнали відбивання. Для цього використовували білий папір, просочений епоксидною смолою. На такому матеріалі при відповідному збільшенні можна було проводити аналіз твердих частинок. Смугу ділили на m_s однакові частини, проводячи лінії по радіусам диска: першу лінію – через початок, а останню – через кінець фігури напилення. Отримані сектори аналізували на кількість твердих частинок на одиниці площі (концентрацію частинок). Для кожного сектора розраховувався час від початку напилення аналогічно з формулою (1).

На рис. 2 зображена залежність концентрації частинок речовини, яка напилювалась, від часу влучення в підкладку τ . Час відраховувався від початку напилення.

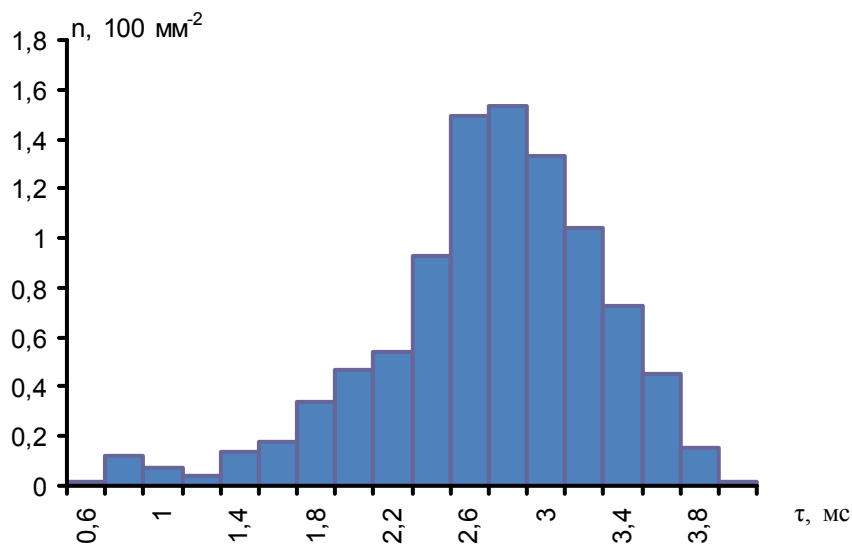


Рис. 2. Розподіл концентрації частинок електрокорунду в двофазному потоці.
 Подача в ствол гранул 5÷160 мкм

Для такої функції характерний максимум, який залежить від умов детонаційного наплення. Максимум концентрації частинок відтворюється в другій половині процесу наплення. Виявлені в мікроскопі частинки здебільшого проплавлені, хоч при зіткненні з підкладкою мали тверду основу, бо зберегли форму. В той же час на смузі перед максимумом добре видно речовину, яка напилалась у вигляді окремих плям тонкого несущільного шару. Цей шар утворився з повністю розплавлених гранул, які при зіткненні з підкладкою розтікались по її поверхні. За умови одноразового наплення при оптичному збільшенні $100\times$ окремі плями добре розрізняються, і тому можна точно порахувати кількість частинок на одиниці площі.

Витікання двофазного потоку можна описати базуючись на дослідженнях, які проводились методом надшвидкісної фотореєстрації [5, 9], а також на наших дослідженнях [7]. Увесь потік розділяється на дві основні частини. Перша частина включає в себе найбільш дрібні частинки, що рухаються разом з частиною полум'я, яке має підвищену температуру над середньою по детонаційній хвилі. Ця частина двофазного потоку витікає із ствола протягом $\sim 1,6$ мс. Швидкість частинок у передньому фронті мало відрізняється від швидкості продуктів детонації.

Через 1,2 мс після появи свічення на виході ствола в результаті взаємодії потоку, що витікає із ствола, з відбитою хвилею утворюється область із частинками, які рухаються дуже повільно. Це пов'язано зі зменшенням густини газу, який витікає. У цей час зменшується влучання частинок на підкладку (рис. 2). Між першою та другою частинами двофазного потоку утворюється розрив. Майже одночасно з формуванням малорухомої неоднорідності починається витікання основного потоку. Зменшення швидкості відбувається значно повільніше, ніж в першій частині потоку, тому що більшість твердих частинок, які утворюють основний потік, має більший розмір, і вони значно інертніші.

При русі двофазного потоку усередині й поза стволом над частинками здійснюються такі перетворення: 1) плавлення; 2) охолодження в польоті й кристалізація; 3) подрібнення; 4) злиття в результаті зіткнень; 5) випаровування; 6) конденсація; 7) взаємодія зі стінками ствола; 8) взаємодія з киснем повітря.

Температура продуктів детонації сягає 4600 К, і тому достатньо дрібні частинки майже всіх матеріалів плавляться і взаємодіють із підкладкою в рідкому стані. Більші частинки, які належать двофазному потоку, можуть бути розплавлені або оплавлені тільки на поверхні.

На поверхні покриття при збільшенні $100\times$ виявлено закріплені частинки, які мають правильну яйцеподібну форму, тобто були оплавлені, але при ударі не деформувалися, що вказує на наявність твердого ядра.

При дослідженні ступеня оплавлення частинок у різних місцях двофазного потоку в кінці смуги наплення в момент формування покриття близько 70 % матеріалу перебувало у твердому стані. У двофазному потоці частинки рухаються, маючи тверду основу (кern) і рідку оболонку.

Існує кілька причин, що перешкоджають зменшенню розміру частинок. По-перше, розриву частинок заважає наявний твердий kern. При русі частинки в стволі, де зазвичай швидкість газу більша швидкості частинок, при наявності керна рідка частина захищена ним від впливу потоку, що набігає. У випадку, коли швидкість частинки більша швидкості газу, тверде ядро також захищає рідку оболонку від розриву. По-друге, зменшенню розміру часток перешкоджає їхнє злиття при зіткненнях. Основна причина

зіткнень частинок – різниця їхніх швидкостей, що, у свою чергу, обумовлено відмінністю їхнього розміру. Таким чином, основним фактором зміни розміру частинок залишається випаровування.

Кінетика випаровування при температурах, які нижчі кипіння, описуються рівнянням Герца-Кнудсена. Рівняння розглядає число молекул dN_e , які випаровуються з поверхні площею S за час dt :

$$\frac{dN_e}{S \cdot dt} = \frac{\alpha \cdot p_n(T)}{\sqrt{2\pi mkT}}, \quad (2)$$

де $p_n(T)$ – парціальний тиск речовини при температурі поверхні T , m – маса молекули, k – стала Больцмана. Коефіцієнт α враховує, що частина молекул може повертатись на поверхню випаровування. Однак через те, що випаровування відбувається в дуже нерівноважній системі, можна вважати, що $\alpha = 1$. Ленгмюром було доведено, що рівняння Герца-Кнудсена може застосовуватись також для вільної поверхні твердого тіла. Множення рівняння на масу молекули дає швидкість випаровування по масі:

$$\Gamma = m \frac{dN_e}{S \cdot dt} = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} p_n(T), \quad (3)$$

Швидкість випаровування по масі з одиниці поверхні Γ пов'язана із загальною кількістю речовини M_e таким співвідношенням:

$$M_e = \iint_{iS} \Gamma dS dt. \quad (4)$$

Якщо вважати, що процес випаровування із сферичної поверхні з початковим радіусом r_0 відбувається рівномірно, то можна визначити час, який потрібний на повне випаровування частинок:

$$t = \frac{\rho_v \sqrt{2\pi k N_A T}}{\rho_n(T) \sqrt{\mu}} r_0, \quad (5)$$

де ρ_v , μ – густина і молекулярна маса речовини, що напильється, N_A – стала Авогадро.

При розрахунках треба враховувати, що температура поверхні частинки є проміжною між середньою температурою частинки і газової фази. Протягом періоду руху частинки всередині ствола температура поверхні частинки $\approx 2500\text{K}$ [5].

Формула (5) дає можливість теоретично передбачити, які частинки повністю випаруються, не долетівши до підкладки.

Неважко визначити розподіл гранул за розмірами у порошок, який завантажується в ствол детонаційної установки, маючи оптичний мікроскоп із мірною шкалою. Такі обчислення проводились, і це дало можливість розрахувати коефіцієнт використання речовини як відношення маси напильної речовини до маси речовини, яка завантажувалась. Крім того, знаючи масу речовини, яка завантажувалась, можна обчислити кількість частинок, які потрапляють на підкладку.

Залежність концентрації частинок, які напильались, від часу процесу створення покриття (рис. 2) дає можливість визначити загальну кількість частинок, які потрапили на підкладку:

$$N = \sum_{i=1}^{m_s} S_i n_i \tau, \quad (6)$$

де S_i , n_i – напильна площа та концентрація частинок i -го сектора.

Хоча двофазний потік розглядався нами досить наближено, тобто враховувались тільки основні процеси, однак розходження між обчисленим і теоретичним значеннями кількості частинок виявилось у межах 10 %.

Висновки та перспективи досліджень. Наші уявлення про взаємодію двофазного потоку детонаційної установки з підкладкою підтверджуються розподілом концентрації частинок у потоці і забезпечують умови для розрахунку напильного чистового покриття. В експерименті визначена залежність кількості частинок, напильених на одиниці площі, від початкового моменту створення покриття. Це дає можливість розраховувати концентрацію напильної речовини в різних місцях підкладки після декількох пострілів детонаційної установки. Для кожного з цих пострілів задається початок напильлення з метою отримання покриття необхідної товщини.

Для підвищення точності кінцевих розмірів виробу виникає потреба прискорити розрахунок кутів повороту підкладки, при яких запалюється детонаційна суміш. Це планується робити, використовуючи чисельні методи. При суттєвому зменшенні часу перезарядки детонаційного пристрою (до 0,2 с в промислових установках) виникає необхідність автоматизувати керування моментом запалювання. Для здійснення цієї мети слід використати контролери і персональні комп'ютери з відповідним програмним забезпеченням. Наші дослідження продовжуються також і в напрямку вдосконалення математичного апарату для розрахунків щодо конкретного виробу не тільки з метою напильлення однорідного твердого зносостійкого покриття, а й для відновлення розміру і циліндричної форми зношеної деталі. В останньому випадку потрібно враховувати ще й функцію товщини покриття на поверхні деталі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Хасуй А. Техника напыления. – М.: Машиностроение, 1995. – 288 с.
2. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. – М.: Наука, 1978. – 224 с.
3. Шестеренков В.И. Детонационное нанесение покрытий // Порошковая металлургия. – 1968. – № 1. – С. 37–46.
4. Клименко В.С., Скадин В.Г., Шаривкер С.Ю. Характеристики газового импульса при детонационном напылении // Порошковая металлургия. – 1976. – № 11. – С. 26–29.
5. Гладилин А.М., Григоров А.И., Сигадулин Г.Г. Детонационные процессы в двухфазных средах. – М.: Недра, 1991. – 144 с.
6. Зверев А.И., Астахов Е.А., Шаривкер С.Ю. Детонационные покрытия в судостроении. – М.: Судостроение, 1979. – 232 с.
7. Грабар І.Г., Рудніцький В.А., Захаров В.К., Кришевський М.Б., Кравченко В.П. Моделювання процесів в задачі двофазного потоку та оптимізація технологій нанесення біокерамічного покриття на титанові імплантанти // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2006. – Вип. 4. – С. 50–62.
8. Грабар І.Г., Рудніцький В.А., Ломакін В.О. Автоматизована система управління детонаційно-плазмовою установкою // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: научно-техн. конф. – Одеса. – 2007. – Том 1. – С. 50–52.
9. Дубовик А.С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. – М.: Наука, 1975. – 232 с.

РУДНІЦЬКИЙ Валентин Анатолійович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, докторант кафедри технології машинобудування та конструювання технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- нові технології;
- детонаційно-плазмове напылення;
- плазма газового розряду.

Подано 03.11.2008

Рудніцький В.А. Фізичні основи технології напилення чистового покриття

Рудницкий В.А. Физические основы технологии напиления чистового покрытия

Rudnitsky V.A. Physical bases of technology of a coating which does not require machining

УДК 621.793

Физические основы технологии напиления чистового покрытия / В.А. Рудницкий

Работа посвящена детонационному напилению. Приведен анализ взаимодействия двухфазного потока, который транспортируется детонационной волной, с подкладкой. Рассмотрена возможность нанесения на цилиндрическую поверхность вала покрытия, которое не нуждается в механической обработке с целью восстановления формы и размера изделия.

УДК 621.793

Physical bases of technology of a coating which does not require machining / V.A. Rudnitsky

The article is devoted detonation coating. The analysis of interaction of a biphas stream which is transported by a detonation wave, with substrate is resulted. The opportunity of receiving on a cylindrical surface of a shaft of a covering which does not require machining with the purpose of restoration of the form and the size of a product is considered.