

А. А. Карпеченко¹
М. М. Бобров¹
О. І. Савенков¹

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТРУМЕНЯ НА СТУПІНЬ ДЕФОРМАЦІЇ ЧАСТИНОК ПІД ЧАС ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПИЛЕННЯ

¹Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв

Проаналізовано науково-технічну інформацію щодо процесу поширення гетерофазного турбулентного струменя з металевими частинками під час електродугового напилення. Встановлено, що на сьогодні є неповними дані щодо визначення параметрів удару та деформації частинок, що напилюються. Це має велике значення для вибору оптимальних температурно-часових параметрів подальшої термічної обробки сформованих покриттів. Проведено розрахунки основних газодинамічних параметрів під час електродугового напилювання: швидкості повітря та частинок, що напилюються, по осі струменя та по його перерізу на дистанції напилення 100 мм. Встановлено, що швидкість повітря на початковій ділянці струменя є постійною та становить близько 310 м/с. На дистанції близько 35 мм закінчується ця ділянка, а швидкість повітря починає знижуватися і на дистанції напилення 100 мм становить 135 м/с. Показано, що на початковій ділянці струменя частинки, що напилюються, прискорюються та досягають максимальної швидкості близько 80 м/с. За подальшого збільшення відстані від зрізу сопла частинки поступово втрачають швидкість та на дистанції напилення 100 мм вона становить близько 75 м/с. На основі визначення поверхневого натягу, розраховано середній розмір крапель дроту Св-08Г2С під час відривання від електроду (214 мкм) та на підльоті до підкладки (82 мкм). З урахуванням отриманих даних проведено розрахункове визначення ступеня деформації частинок, що напилюються, по плямі напилення на дистанції 100 мм. Встановлено, що найбільшу деформацію мають частинки по осі потоку (близько 86 %), що пояснюється їхньою високою кінетичною енергією. Експериментально визначено середнє значення діаметра частинок, що напилюються, на дистанції 100 мм у разі розпилення у воду дроту Св-08Г2С (84 мкм), що добре корелюється з розрахунковим значенням. Підготовлено мікрошліф та визначено ступінь деформації частинок по плямі напилення. Проведено порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних щодо ступеня деформації частинок, який показав різницю між ними не більше ніж ± 1 %.

Ключові слова: електродугове напилення, частинки, що напилюються, ступінь деформації, швидкість, газодинамічні параметри.

Вступ

В останні роки значного поширення набули процеси напилювання багатофункціональних покриттів, які надають можливість суттєво скоротити витрати дефіцитних матеріалів, підвищити якість та надійність машин, обладнання тощо. З широко використовуваних технологій нанесення покриттів інтенсивний розвиток отримала група газотермічних методів, що включає найпростіший та продуктивний електродуговий метод, який набув поширення через нанесення відновних та захисних корозійностійких покриттів на різноманітні конструкції та деталі. Однак, отримані покриття не завжди забезпечують достатній рівень фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, зокрема необхідні значення твердості, щільності, міцності зчеплення та зносостійкості. Аналіз ефективності сучасних способів підвищення фізико-механічних властивостей газотермічних покриттів показує, що основний результат їхнього застосування полягає переважно у забезпеченні високих швидкостей частинок, що напилюються, та зменшенні їхніх розмірів, зокрема, до наномаштабного рівня. Альтернативний шлях полягає у застосуванні передрекристалізаційної термічної обробки (ПТО) напилених покриттів, що дозволяє підвищити їхні фізико-механічні властивості за рахунок отримання здрібноної і нанорозмірної полігонізаційної субструктури. Проте, для вибору

оптимальних параметрів ПТО найважливішим фактором є прогнозування ступеня деформації частинок, що напилуються. Це значною мірою впливає на температуру та час витримки у подальшій обробці покриття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Електродугове напилення характеризується простотою реалізації та відносно малою кількістю факторів, які впливають на процес формування покриття. Процеси, що відбуваються під час електродугового напилення, описані не повно через особливості початкових умов. У відносно невеликій зоні відбувається одночасно декілька процесів: горіння електричної дуги, розплавлення дрітів в цій дузі, видування розплавленого металу із зони горіння, нагрівання транспортувального газу з одночасним охолодженням дуги і розплавленого металу, формування гетерофазного струменя.

Теоретичні дослідження процесу поширення двофазного турбулентного струменя з частинками, що розпилюються, викликають труднощі внаслідок істотних відмінностей його від процесу поширення однофазних потоків. До таких відмінностей можна віднести і зворотний вплив важкої домішки на турбулентність, і особливості перенесення інерційних часток у порівнянні з газом, що їх розпилює, і притаманна течії такого типу нерівноважність (відносний рух фаз), а також накладання на турбулентну дифузію іншого типу перенесення — рух частинок під дією аеродинамічних підйомних сил та ін. У роботах [1]—[3] запропоновано теорію турбулентних струменів, яка розглядає зокрема розподіл поля швидкостей в прямооточних затоплених струменях, тобто у струменях не обмежених в просторі твердими стінками і поширюються в середовищі, яке має такі самі фізичні властивості, що й сама речовина струменя. У разі гальмування частки активного прямооточного затопленого потоку разом із захопленими частинками з навколишнього середовища утворюють турбулентний приграничний шар струменя, товщина якого у напрямку течії зростає. Якщо у вихідному перерізі сопла, з якого витікає розпилювальний газ, швидкості розподіляються рівномірно, то на початковій ділянці струменя товщина приграничного шару дорівнює нулю. У безпосередній близькості від зрізу сопла з внутрішньої сторони приграничний шар переходить в ядро постійних швидкостей. Таким чином, на внутрішній границі приграничного шару швидкість незбуреного потоку дорівнює швидкості його витікання з сопла. З віддаленням від сопла разом з потовщенням приграничного шару відбувається звуження ядра постійної швидкості. Цей процес призводить до того, що на деякій відстані ядро незбуреного потоку зникає зовсім (перехідна ділянка струменя). За подальшого віддалення від сопла приграничний шар заповнює вже увесь поперечний переріз, тягнучись аж до осі потоку, і розмивання потоку супроводжується не тільки збільшенням ширини струменя, але і падінням швидкості на її осі (основна ділянка струменя). Проте, у згаданих роботах відсутні дані щодо визначення параметрів частинок в момент удару об підкладку та їхнє деформування.

Метою роботи є узагальнення математичної моделі гетерофазного струменя під час електродугового нанесення покриттів щодо визначення впливу його газодинамічних параметрів на ступінь деформації частинок, що напилуються.

Результати дослідження

У ковпак розпилювальної голівки з передньої стінки витікає стиснене повітря [4]. Витікання повітря з ковпака відбувається через отвір, діаметр якого дорівнює 6 мм за підтримки в ковпаку постійного тиску. Оскільки в ковпак безперервно надходить стиснене повітря, можна вважати, що розміри резервуара настільки великі у порівнянні з розмірами вихідного отвору, що можна повністю нехтувати швидкістю руху газу всередині резервуара, і, отже, тиск, щільність газу і температура всередині резервуара матимуть значення p_0 , ρ_0 і T_0 .

Швидкість витікання газу можна визначати за формулою

$$v = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_0 \rho_0 \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT}, \quad (1)$$

де k — показник адиабати.

Відношення p/p_0 називається ступенем розширення газу. Аналіз формули показує, що вираз, який стоїть під коренем у квадратних дужках, дорівнює нулю, якщо $p/p_0 = 1$ і $p/p_0 = 0$.

По всій довжині струменя можна виділити три основних ділянки: початкова ділянка струменя

на якому зберігається ядро постійних швидкостей, перехідна ділянка на якій ядро постійних швидкостей вже зникає, а швидкість змінюється незначно і основна ділянка, в якій швидкість струменя на осі зменшується.

Відношення тисків p/p_0 , за якого масові витрати досягають максимального значення, називається критичним. Можна показати, що критичне відношення тисків дорівнює

$$\left(\frac{p}{p_0}\right)_{\text{кр}} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k+1}}. \quad (2)$$

З досягненням тиском p критичного значення витрати стають максимальними, а швидкість витікання досягає критичного значення, яке дорівнює місцевій швидкості звуку. Швидкість звуку визначається за відомою формулою

$$v_{\text{зв}} = \sqrt{k \frac{p}{\rho}} = \sqrt{kRT}. \quad (3)$$

Після спрощення рівняння для знаходження швидкості повітря на початковій ділянці набуде вигляду

$$\omega_{\text{дозв}} = 1,08\sqrt{RT}, \quad (4)$$

де R — питома газова стала (287 Дж·К/кг); T — температура, К.

Для практичних розрахунків закономірностей розвитку прямооточних струменів необхідно знати закони зміни максимальної швидкості по довжині струменя. Для визначення цієї величини проведені численні експерименти та розроблена полумірична теорія, що застосовує закон збереження кількості руху у струмені. Затухання швидкості, по осі основної ділянки струменя для повітря можна виразити формулою [2]

$$V_{\text{пов}} = \omega_{\text{дозв}} \left(\frac{0,96}{\frac{aL}{R_0} + 0,29} \right), \quad (5)$$

де a — коефіцієнт турбулентності повітряного струменя; L — відстань від зрізу повітряного сопла до певної точки струменя, м; R_0 — радіус повітряного сопла, м.

Для знаходження коефіцієнт турбулентності повітряного струменя використовуємо формулу [5]

$$a = \left(0,4 \frac{d_{\text{др}}}{D_0} \right)^{2,56} + a_1, \quad (6)$$

де $d_{\text{др}}$ — діаметр дроту в м; D_0 — діаметр повітряного сопла, м; a_1 — коефіцієнт турбулентності для певного сопла (для сопел діаметром 3 мм $a_1 = 0,057$, а для сопел діаметром 6 мм — $a_1 = 0,056$).

Дані для розрахунку подані у таблиці. За результатами розрахунку побудовано графік, показаний на рис. 1.

Параметри для розрахунку швидкості повітря	
Діаметр сопла D_0 , м	0,006
Радіус сопла R_0 , м	0,003
Питома газова стала R , Дж·К/кг	287
Діаметр дроту $d_{\text{др}}$, м	0,0012
Коефіцієнт турбулентності для сопла a_1	0,056
Температура T , К	293
Швидкість повітря на початковій ділянці, м/с	313,1832
Коефіцієнт турбулентності повітряного струменя	0,057595
Довжина початкової ділянки струменя, м	0,034899

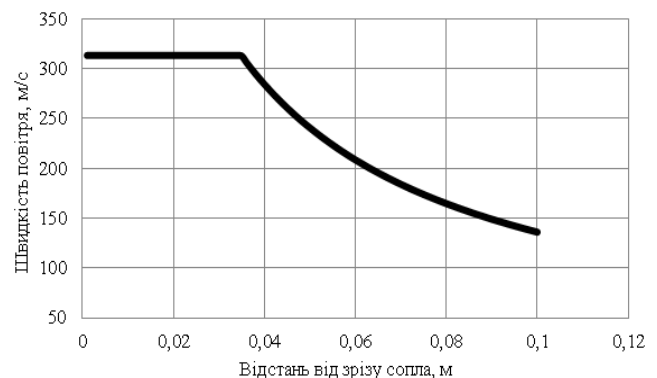


Рис. 1. Графік залежності швидкості повітря від відстані до зрізу сопла

Згідно з наведеними даними встановлено, що швидкість стисненого повітря на початковій ділянці струменя є постійною та складає близько 313 м/с. На дистанції приблизно 35 мм закінчується

ся ця ділянка та швидкість повітря починає знижуватися і на дистанції напилання 100 мм становить 135 м/с.

З віддаленням від сопла, осьова швидкість стисненого повітря змінюється, оскільки набуває значення від початкового (313 м/с) до нуля. Причиною зменшення цієї швидкості, вочевидь, є опір навколишнього середовища (атмосферного повітря).

Осьова швидкість металевих розплавлених частинок переважає над всіма іншими компонентами (що підтверджується малими кутами розпилення струменя, які не перевищують 12°), їхнє переміщення вздовж осі можна вважати як рівноуповільнений рух тіла. Коли частинки пройдуть початкову ділянку та вийдуть за її межі, їхня осьова швидкість може бути розрахована за формулами [2]

$$\begin{cases} S_0 = 0,67R_a/a, \\ \tau = D/v_{\text{сер}} \cdot n, \\ v_{\text{чп}} = \omega_{\text{дозв}} - \frac{1}{\frac{6C_x\gamma_{\text{пов}}\tau}{4d\gamma_m} + \frac{1}{\omega_{\text{дозв}}}}, \\ v_{\text{ч}} = v_{\text{чп}} \left(1 - \frac{3C_x\gamma_{\text{пов}}L}{4R_a\gamma_m} \right)^{1/2}, \end{cases} \quad (7)$$

де S_0 — відстань від зрізу сопла до кінця початкової ділянки, м; τ — проміжок часу в розрахунку, с; D — дистанція напилання, м; $v_{\text{сер}}$ — середня швидкість частинок по осі струменя, м/с (для електродугового напилання близько 60 м/с); n — кількість розрахункових точок; $v_{\text{чп}}$ — швидкість часток металу в межах початкової ділянки струменя, м/с; C_x — коефіцієнт лобового опору частинки; $\gamma_{\text{пов}}$ — щільність повітря, кг/м³; d — діаметр частинок, м; γ_m — щільність металу в кг/м³; $v_{\text{ч}}$ — осьова швидкість частинок за межами початкової ділянки м/с; R_a — радіус кулястої частинки, м; L — відстань до точки, м.

З урахуванням відпрацьованих технологічних параметрів, зокрема продуктивності процесу, можна оцінити середній розмір частинок розплавленого металу в момент диспергування за виразом [6]

$$d = K_1 K_2 \sqrt[3]{G_H/\gamma\mu}, \quad (8)$$

де K_1 — константа, що залежить від властивостей напилуваного матеріалу (для сталі 1,61); K_2 — константа, що залежить від радіусу та форми сопла (для циліндричних сопел $K_2 = 3,75/r_c + 0,29$); G_H — продуктивність напилання; γ — густина матеріалу, що напилується; μ — коефіцієнт, який враховує неперервність горіння дуги ($\mu_{\text{max}} = 1$).

Крапля, яка щойно відірвалася від торця електроду відразу ж подрібнюється газовим струменем і її розмір можна знайти за формулою [1]

$$d_0 = 3R\sqrt{\frac{\pi}{We}}, \quad (9)$$

де R — радіус початкової частинки, м; We — критерій Вебера.

Водночас критерій Вебера знаходиться за формулою [5]

$$We = \frac{W^2 \rho_{\Gamma} d_{\text{ч}}}{\sigma_{\text{р}}}, \quad (10)$$

де W — швидкість газового струменя, м/с; ρ_{Γ} — густина газу, кг/м³; $d_{\text{ч}}$ — діаметр початкової частинки, м; $\sigma_{\text{р}}$ — коефіцієнт поверхневого натягу рідини, Н/м.

За незмінного режиму напилування, визначальною характеристикою, що впливає на розмір частинок, є сила поверхневого натягу матеріалу. Одним з істотних факторів, що визначають значення поверхневого натягу є хімічний склад сплаву. Для розрахунку поверхневого натягу сталі може бути використана запропонована у роботі [7] формула

$$\sigma = \sigma_{Fe} - 2000 \cdot \lg \sum_{ni} F_i x_i, \quad (11)$$

де σ_{Fe} — поверхневий натяг чистого заліза, Дж/м² (становить 1850 Дж/м²); x_i — атомна частка i -го компонента у сплаві; n_i — кількість молей i -го компонента; F_i — параметр, що характеризує капілярну активність легувального елемента.

Розрахунок за формулою (11) показав, що поверхневий натяг розплаву, що за хімічним складом відповідає дроту Св-08Г2С, становить 1605 Дж/м². Розраховували діаметр частинок та їхню швидкість за формулами (7)—(11) для випадку напилювання дроту Св-08Г2С. Параметри технологічного режиму напилювання: тиск повітря 0,6 МПа, сила струму 100 А, напруга 25 В, дистанція напилювання 100 мм. Середній розмір частинок розплавленого металу в момент диспергування, оцінений за формулою (9), становив 214 мкм. Середній діаметр частинок після 7 ітерацій розрахунків за формулою (10) становив 82 мкм. Тому швидкість визначали для частинок розміром 82 мкм. За результатами розрахунку побудовано графік, показаний на рис. 2.

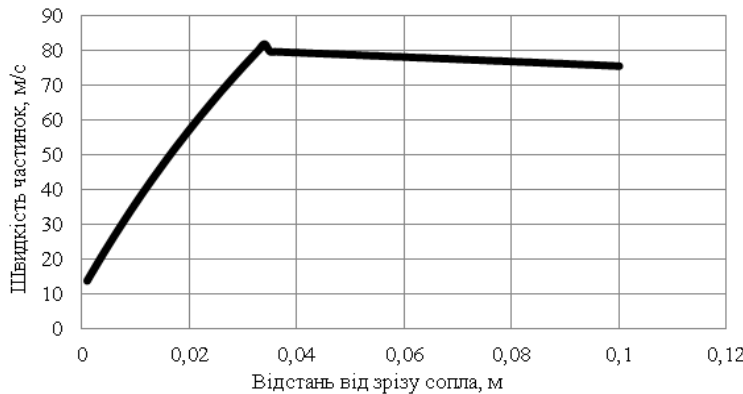


Рис. 2. Графік залежності швидкості частинок від відстані до зрізу сопла

хаються у необмеженому просторі. Профіль швидкості для повітря та частинок може бути виражений формулами

$$v_{пов,y} = v_{пов,L} \left[1 - \left(\frac{y}{L} \right)^{3/2} \right]^2; \quad (12)$$

$$v_{ч,y} = v_{ч,L} \left[1 - \left(\frac{y}{L} \right)^{3/2} \right]^2, \quad (13)$$

де $v_{пов,y}$ — швидкість повітря в поперечному перерізі факела, м/с; $v_{пов,L}$ — осьова швидкість повітря на відстані L від зрізу сопла, м/с; y — радіус струменя, що розширився, м; L — відстань до певної точки, м; $v_{ч,y}$ — швидкість частинок у поперечному перерізі факела в м/с; $v_{ч,L}$ — швидкість частинок на відстані y від зрізу сопла, м/с. Результати розрахунку графічно показано на рис. 3.

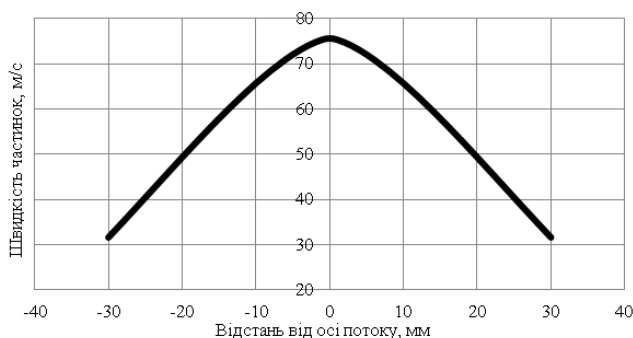


Рис. 3. Графік залежності швидкості частинок від відстані до зрізу сопла

ності від виду матеріалу, що напилюється, його дисперсності і режиму напилювання ступінь деформації частинок і кількість мікропустот можуть значно змінюватися, приводячи до суттєвих змін структури і властивостей газотермічних покриттів. Динаміка взаємодії розплавленої частинки

Отже, на початковій ділянці струменя частинки, що напилюються прискорюються та досягають максимальної швидкості близько 80 м/с. За подальшого збільшення відстані від зрізу сопла частинки поступово втрачають швидкість, на дистанції напилення 100 мм вона складає близько 75 м/с.

У роботі [3] узагальнено експериментальні дані багатьох дослідників та встановлено подібність полів швидкостей у всіх поперечних перерізах основної ділянки турбулентних струменів будь-якої форми, що ру-

Таким чином, максимальну швидкість частинки мають по осі струменя. Зі збільшенням відстані від осі потоку їхня швидкість значно зменшується і стає недостатньою для формування покриття (< 30 м/с).

Фізична природа формування шаруватої структури з дископодібних кристалітів під час отримання газотермічних покриттів пов'язана з послідовним осадженням прискорених і нагрітих у високотемпературному струмені частинок дисперсної фази, які у результаті удару об поверхню і подальшої пластичної деформації набувають дископодібної форми. В залеж-

з поверхнею в процесі напилення докладно вивчена лише для модельної ситуації удару об гладку поверхню твердого тіла. У відомих роботах [7] в основі моделі є результати досліджень удару і розтікання крапель рідини. Така аналогія ґрунтується на близькості гідродинамічних властивостей багатьох рідких металів і води.

У роботах, в яких досліджено процес деформації та кристалізації частинок в процесі формування газотермічних покриттів [8], [9], вважається, що швидкість руху вершини краплі по нормалі до поверхні під час її розтікання практично постійна і дорівнює початковій швидкості. Сферична частка в найпростішому випадку розтікається по поверхні у вигляді диска. При цьому відношення діаметра диска D до вихідного діаметра частинки d дорівнює [10]

$$D/d = 0,27 \ln(We) + 0,12. \quad (14)$$

За цією формулою проведено розрахунок величини деформації частинок діаметром 82 мкм по плямі напилення. Для верифікації отриманих результатів виконували їхнє порівняння з експериментальними даними. Напилювання електродугових покриттів проводили на установці КДМ-2, у комплект якої входить електродуговий апарат ЕМ-14М з центральною сопловою системою подачі стисненого повітря [4]. Як напилюваний матеріал використовували зварювальний дріт марки Св-08Г2С. Технологічний режим напилювання становив: тиск повітря 0,6 МПа, сила струму 100 А, напруга 25 В, дистанція напилювання 100 мм. Для визначення розміру частинок напилювання виконували у воду. Сушку зібраних проб розпиленого дроту виконували в сушильній шафі ШСВ 3,5.3,5.6/3,5 за температури 150 °С протягом 3 годин. Знімки частинок, що напилюються, (рис. 4а) отримували за допомогою цифрової камери Delta Optical HDCE-20С, яка укомплектована програмним забезпеченням для оброблення зображень Score Image 9.0, на оптичному металографічному мікроскопі ММУ-3. Розмірна лінійка на знімках встановлювалася за допомогою об'єкт мікрометра ГОСТ 7513-55, який знімався з тим самим збільшенням, що й відповідна світлина. За допомогою програмного комплексу для аналізу зображень Siams визначено розмір близько 1000 частинок та побудовано гістограму розподілу частинок за розміром (рис. 4б).

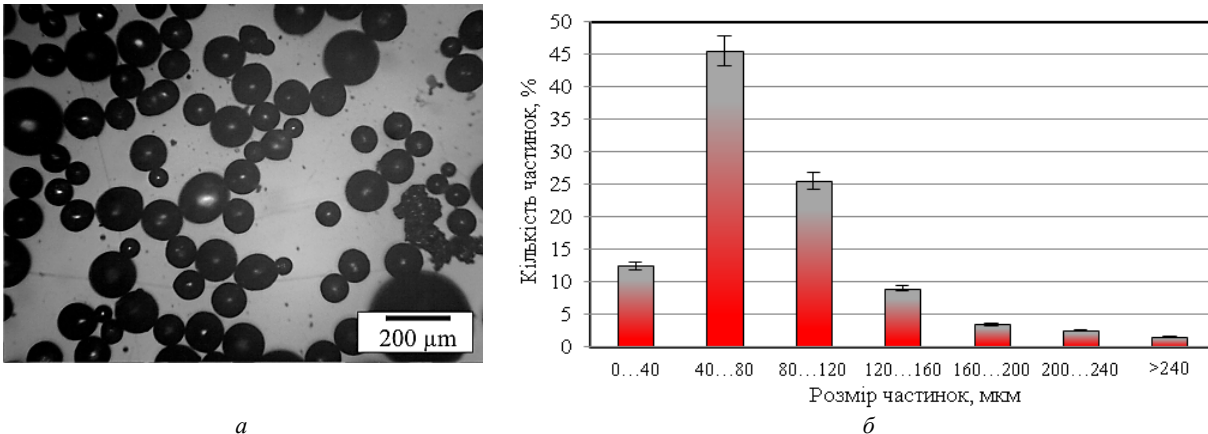


Рис. 4: а — проби напилюваних у воду частинок за електродугового напилення дроту марки Св-08Г2С; б — гістограма розподілу частинок за розміром

Для якісної оцінки розміру частинок знаходили середні визначені значення діаметра частинок за формулою

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n w_i d_i, \quad (15)$$

де w_i — кількість частинок, %; d_i — середнє у діапазоні значення розміру частинок, мкм.

Для електродугового напилювання дротом Св-08Г2С середнє визначене значення діаметра частинок становило 84 мкм, що добре корелюється з розрахунковим значенням (82 мкм).

Для визначення величини деформації частинок під час напилювання виготовили поперечний шліф плями напилення та визначали висоту дисків за допомогою перерахованого обладнання (рис. 5а). Порівняння розрахункових (лінія) та експериментальних результатів (точки) визначення ступеня деформації частинок показано на рис. 5б.

Аналіз наведених даних (рис. 5б) показує, що найбільший ступінь деформації мають частинки по осі потоку (близько 86%). З віддаленням від неї швидкість частинок, що напилюються, значно зменшується, що призводить до значного зниження ступеня їхньої деформації. Розрахункові та

експериментальні дані відрізняються не більше ніж $\pm 1\%$. Більший збіг мають результати визначення ступеня деформації частинок по осі потоку та на невеликій відстані від неї (до 10 мм).

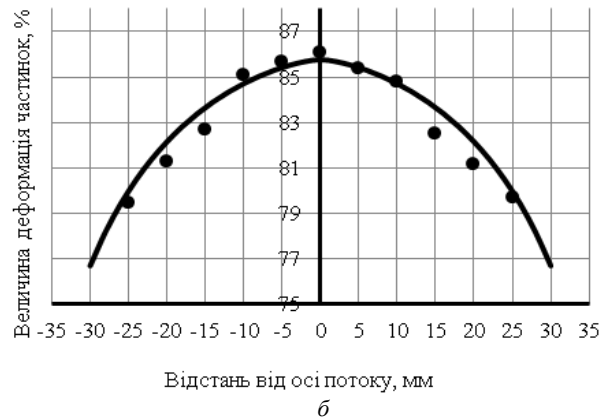
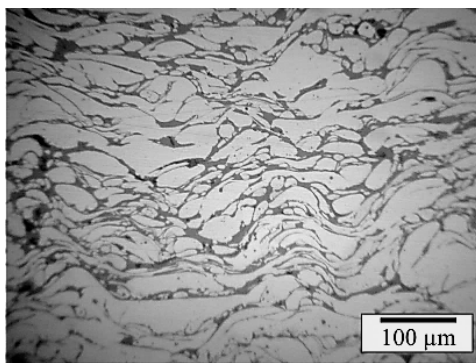


Рис. 5: *a* — мікроструктура поперечного шліфа плями напилення (відстань від осі потоку 10 мм); *б* — результати розрахункового та експериментального визначення ступеня деформації напилюваних частинок

Висновки

Проаналізовано основні теоретичні дослідження щодо процесу поширення гетерофазного турбулентного струменя з металевими частинками під час електродугового напилювання. Вказано на відсутність узагальнених досліджень щодо впливу газодинамічних параметрів струменя на ступінь деформації частинок, що напилюються, при співударі з підкладкою та попередніми шарами покриття. Проведені розрахунки основних газодинамічних параметрів в процесі електродугового напилювання. Встановлено, що швидкість повітря на початковій ділянці струменя є постійною та становить близько 310 м/с. На дистанції приблизно в 35 мм закінчується ця ділянка, швидкість повітря починає знижуватися і на дистанції напилювання 100 мм становить 135 м/с. Показано, що на початковій ділянці струменя частинки, що напилюються, прискорюються і досягають максимальної швидкості близько 80 м/с. З подальшим збільшенням відстані від зрізу сопла розпилювача частинки поступово зменшують швидкість, на дистанції напилювання 100 мм вона становить близько 75 м/с. Проведено розрахунки швидкості частинок у поперечному перерізі струменя на дистанції напилювання 100 мм. З урахуванням отриманих даних проведено розрахункове визначення ступеня деформації частинок, що напилюються, по плямі напилення на дистанції 100 мм. Встановлено, що найбільший ступінь деформації мають частинки по осі потоку (близько 86%). З віддаленням від неї швидкість частинок, що напилюються, значно зменшується. Це приводить до значного зниження ступеня їхньої деформації. Експериментально визначено середнє значення діаметра частинок, що напилюються, на дистанції 100 мм у разі розпилювання у воду дроту з Св-08Г2С (84 мкм). Підготовлено мікрошліф та визначено ступінь деформації частинок по плямі напилення. Розрахункові та експериментальні дані відрізняються не більше ніж $\pm 1\%$. Більший збіг мають результати визначення ступеня деформації частинок по осі потоку та на невеликій відстані від неї (до 10 мм).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] П. А. Лыков, Р. М. Байтимеров, Е. В. Сафонов, и А.О. Шульц, «Моделирование процесса распыления расплава в газовой струе», *Вестник ЮУрГУ*, № 2, с. 148-154, 2013.
- [2] В. И. Юрченко, «Математическая модель двухфазной турбулентной струи с твердыми частицами большого размера», *Известия вузов. Сев-Кавказ. регион. Математическое моделирование и компьютерные технологии*, с. 154-158, 2004.
- [3] Н. М. Воропай, и А. Й. Мажейка, «Распределение температуры в воздушной струе и напыляемой основе при электродуговой металлизации», *Автоматическая сварка*, № 2, с. 18-21, 2004.
- [4] *Аппарат ручной электродуговой повышенной надежности*. Паспорт 36 4552 1402 ПС.
- [5] Б. С. Митин, В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, и Л. К. Дружинин, *Порошковая металлургия и напыление покрытий*. М.: Металлургия, 1987, 792 с.
- [6] С. И. Попель, *Теория металлургических процессов*. М.: ВИНТИ, 1971, 132 с.
- [7] О. П. Солоненко, и А. И. Федорченко, *Теоретические и экспериментальные проблемы взаимодействия частиц с поверхностью*. Ин-т сверхтвердых материалов АН Украины, 1988, с. 15-25.
- [8] R. C. Dykhuizen, "Review of impact and solidification of molten thermal spray droplets," *Journal of thermal spray technology*, № 3 (4), pp. 351-361, 1994.
- [9] S. Fantassi, "Influence of the velocity of plasma-sprayed particles on splat formation," *Journal of thermal spray technology*, № 2(4), pp. 379-384, 1993.

[10] L. B. Cedric, "Impact and solidification of indium droplets on a cold substrate," *International journal of thermal sciences*, № 44, pp. 219-233, 2005.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 10.02.2023

Карпеченко Антон Анатолійович — канд. техн. наук, доцент кафедри матеріалознавства і технології металів, e-mail: karpechenkoanton@gmail.com ;

Бобров Максим Миколайович — канд. техн. наук, асистент кафедри матеріалознавства і технології металів, e-mail: laborantmtm@gmail.com ;

Савенков Олег Ігорович — старший викладач кафедри кондиціонування і рефрижерації, e-mail: oleg.savenkov@nuos.edu.ua .

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв

A. A. Karpechenko¹
M. M. Bobrov¹
O. I. Savenkov¹

Determination of the Influence of Gas-Dynamic Flow Parameters on the Degree of Particles Deformation Under Electric Arc Spraying

¹Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

The paper analyzes the scientific and technical information on the process of propagation of a heterophase turbulent jet with particles of the solid phase during electric arc spraying. It has been established that data on determining the parameters of impact and deformation of sprayed particles are currently incomplete, which is of great importance when choosing the optimal temperature-time parameters for the subsequent heat treatment of the formed coatings. The calculation of the main gas-dynamic parameters for electric arc spraying was carried out: the velocity of air and sprayed particles along the jet axis and along its cross section at a spraying distance of 100 mm. It has been established that the air velocity in the initial section of the jet is constant and is about 310 m/s. At a distance of about 35 mm, this section ends and the air velocity begins to decrease and at a spraying distance of 100 mm it is 135 m/s. It is shown that in the initial section of the jet, the sprayed particles are accelerated and reach a maximum velocity of about 80 m/s. With a further increase in the distance from the nozzle exit, the particles gradually lose speed and at a spraying distance of 100 mm it is about 75 m/s. Based on the determination of the surface tension, the average drop size of the Sv-08G2S wire was calculated upon separation from the electrode (214 μm) and on approaching the substrate (82 μm). Taking into account the data obtained, a calculated determination of the deformation degree of the sprayed particles along the spraying spot at a distance of 100 mm was made. It has been established that particles along the flow axis have the highest degree of deformation (about 86%), which is explained by their high kinetic energy. The average value of the diameter of sprayed particles at a distance of 100 mm was experimentally determined when spraying Sv-08G2S wire (84 μm) into water, which correlates well with the calculated value. A cross section was prepared and the degree of particle deformation along the spray spot was determined. A comparative analysis of the calculated and experimental data on the degree of particle deformation was carried out, which showed the difference between them to be no more than ±1%.

Keywords: electric arc spraying, sprayed particles, degree of deformation, velocity, gas-dynamic parameters.

Karpechenko Anton A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Material Science and Technology of Metals, e-mail: karpechenkoanton@gmail.com ;

Bobrov Maksym M. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant of the Chair of Material Science and Technology of Metals, e-mail: laborantmtm@gmail.com ;

Savenkov Oleh I. — Senior Lecturer of the Chair of Air Conditioning and Refrigeration, e-mail: oleg.savenkov@nuos.edu.ua