

НАНЕСЕННЯ КЕРАМІЧНОГО ПОКРИТТЯ НА ПОВЕРХНЮ ПОРИСТОЇ МАТРИЦІ ІНФРАЧЕРВОНОГО ГАЗОВОГО ПАЛЬНИКА

О.В. Колісніченко, Ю.М. Тюрін, М.А. Полещук

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Запропоновано технологію нанесення керамічного покриття на поверхню фехралевої пористої матриці для покращення технічних характеристик інфрачервоних пальників. Багатокамерний детонаційний пристрій дозволяє формувати покриття на робочій поверхні без істотної зміни її поверхневої проникності. Наявність керамічного покриття з Al_2O_3 на стінках пор змінює режим горіння. Фронт полум'я переміщується в матрицю на невелику глибину за плівку покриття, що приводить до зниження шкідливих викидів при згорянні пальної суміші: чадного газу максимально на 50 %, оксиду азоту на 10...15 %. Ефективність випромінювання матриці збільшується до 2 разів у спектральному інфрачервоному діапазоні довжини хвиль від 5 до 14 мкм. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: пористі металеві матриці, інфрачервоне випромінювання, детонаційне напilenня, керамічне покриття, шкідливі викиди, ефективність випромінювання

Вступ. Використання пористих матеріалів у побуті й техніці обумовлено їхніми унікальними властивостями. Наприклад, пористі металеві матриці мають малу вагу в поєднанні з високою міцністю, що дозволяє їх використовувати в легких конструкційних елементах, акустичній ізоляції, системі поглинання енергії та віброгасниках [1]. Вони також мають велику площу внутрішньої поверхні та високу теплопровідність, і тим самим ідеально підходять для використання у якості теплообмінників, тепловідводів, котлів, пальників і реакторів для виробництва синтез-газу. Висока проникність пористих матеріалів для потоку газу та їхня велика площа поверхні забезпечують високу швидкість теплопередачі за низьких перепадів тиску. Наразі завдяки високій ефективності інтенсивно розвивається виробництво та використання інфрачервоних (ІЧ) газових пальників, які застосовуються у багатьох технологічних і побутових пристроях. В них значна частина енергії від нагрівача передається до об'єкта, що нагрівається, завдяки випромінюванню. Робота ІЧ пальника базується на повному окисненні попередньо створеної газоповітряної суміші на проникній матриці, яка при нагріванні випромінює теплову енергію в ІЧ діапазоні. Горіння газових сумішей на поверхні пористої матриці відбувається за більш низької температури порівняно з факельним спалюванням газу через сильне тепловідведення із зони хімічного перетворення в тіло матриці. Основні характеристики пальників цього типу – щільність потоку випромінювання і, що особливо важливо для побутових приладів, низька кількість токсичних газів у продуктах згорання. Для підвищення ефективності ІЧ пальників дуже важ-

ливо забезпечити повноту згорання газової суміші й відповідно зниження оксиду вуглецю завдяки збільшенню часу перебування продуктів згорання в зоні високих температур. Це може бути досягнуто шляхом застосування радіаційних екранів у вигляді сітки або перфорованих пластин над поверхнею матриці, а також методом спалювання газу в глибокій порожнині матриці, тобто переходом від топографії плоскої матриці до об'ємної [2]. Теплопровідні елементи також використовують у вигляді пластин, що лежать на поверхні або тих, що проникають у тіло матриці [3]. Така конструкція ІЧ пальника дозволяє збільшувати попереднє нагрівання газової суміші під час руху крізь проникну матрицю і температуру поверхні матриці. Теплопровідні пластини (рекуператори) виокремлюють із продуктів згорання і передають до поверхні й у тіло матриці додатковий тепловий потік унаслідок теплопровідності, а також забезпечують додаткове радіаційне нагрівання випромінюванням від поверхонь теплопровідних елементів, які розміщені в області продуктів згорання. Покриття поверхні матриці матеріалом з іншими теплофізичними властивостями також змінює енергетичні й екологічні характеристики пальникового пристрою. Крім того, він може використовуватися як додатковий захід щодо конструкційних способів збільшення ефективності ІЧ пальників. Метою цієї роботи було відпрацювання технології нанесення і вивчення структури, властивостей щільного керамічного шару на поверхні пористої матриці газового пальника, а також випробування газових пальників з керамічним покриттям, визначення ефективності зниження виділення шкідливих домішок і збільшення коефіцієнта корисної дії.

Колісніченко О.В. – <https://orcid.org/0000-0003-4507-9050>, Тюрін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0002-7901-7395>,

Полещук М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-5992-4641>

© О.В. Колісніченко, Ю.М. Тюрін, М.А. Полещук, 2022

Обладнання, матеріали та методики дослідження. Об'єктом дослідження була пориста матриця розміром $250 \times 250 \times 10$ мм із фехралевого сплаву, об'ємною пористістю $\eta_v \approx 0,9$, поверхневою проникністю $\eta = 0,4$ і середнім діаметром пор $0,5 \dots 0,8$ мм. Матеріалом покриття обрано оксид алюмінію, максимальна температура застосування якого 1650 °С, що є більшою за температуру нагрівання пористої матриці в процесі роботи. Покриття на робочій поверхні та у порах матриці формували із порошку AMPERIT® 740.0 Al_2O_3 (рис. 1) фірми H.C.Starck (фракція $5,6 \dots 22,5$ мкм) методом детонаційного напилення. Для цього використовували багатоканальний детонаційний пристрій (БКДП), розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [4]. Дослідження з оптимізації режимів нанесення керамічного покриття проводили на автоматизованому обладнанні (рис. 2), що складається із БКДП, маніпулятора, стандартного газового пульта низького тиску (до 3 атм) для подачі кисню, пропану й повітря, порошкового живильника скребкового типу SX-03-2 фірми Guangzhou Sanxin Metal S&T Co., Ltd. (Китай), автоматизованої системи управління технологічним процесом.

Одним із ключових параметрів, що визначають фізико-хімічні процеси взаємодії матеріалів і саму можливість формування якісних покриттів,

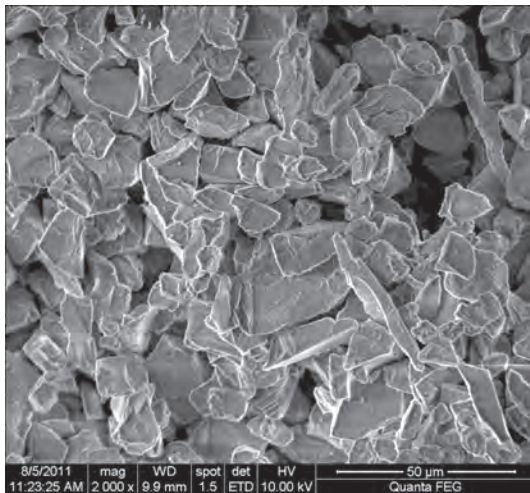


Рис. 1. Вид порошку AMPERIT® 740.0 Al_2O_3 на PEM Quanta 600 FEG, прискорююча напруга 10 кВ

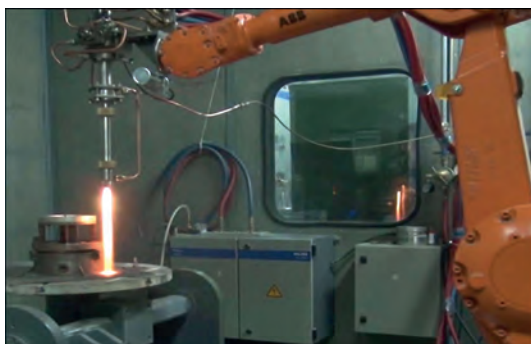


Рис. 2. Пристрій для нанесення покриттів з використанням БКДП

є швидкість і температура порошинки в момент зіткнення з підкладкою. З цією метою в БКДП реалізується режим перетисненого детонаційного горіння газової суміші в спеціально спрофільованих камерах. Акумуляція енергії згоряння від двох камер у циліндричному стволі забезпечує утворення високошвидкісного струменя продуктів детонації, який прискорює і нагріває напилюваний порошок. При цьому швидкість порошку, наприклад Al_2O_3 , досягає 1000 ± 200 м/с [5]. Нанесення покриттів газотермічними методами на тонкостінні деталі – складне завдання через великий тепловий вплив на поверхню. Це може призводити до інтенсивного перегріву, окиснення напилюваних поверхонь, і, як наслідок, зниження адгезії, а зазвичай і руйнування самого виробу. Циклічність процесу є однією з переваг детонаційного методу, що дозволяє знизити температуру зони напилення. Для додаткового охолодження виробу була реалізована повітряна продувка (6 м³/год) через усю тильну поверхню пористої матриці. Подача газів і порошку відбувалася безперервно. Частота слідування детонації становила 16 Гц, витрати порошку – $0,6$ кг/год, швидкість поздовжнього переміщення БКДП відносно виробу – 50 мм/с. Склад і витрати компонентів горючої газової суміші наведено в табл. 1.

Дослідження мікроструктури і елементного складу шару кераміки Al_2O_3 проводили за допомогою растрових електронно-іонних мікроскопів Quanta 200 3D і Quanta 600 (PEM), оснащених енергодисперсійним спектрометром рентгєнвського випромінювання системи PEGASUS фірми EDAX. Пористість визначали металографічним методом з елементами якісного і кількісного аналізів геометрії пор із застосуванням оптичного інвертованого мікроскопа Olympus GX51. Дослідження твердості керамічного шару і підкладки проводили за допомогою автоматизованої системи аналізу мікротвердості DM-8 за методом мікроВіккерса при навантаженні на індентор 25 г.

Результати та їх обговорення. Газотермічні методи напилення ефективно використовують для створення непроникного поверхневого шару на пористих матрицях теплообмінників [6, 7]. На відміну від теплообмінників покриття на ІЧ пальниках

Таблиця 1. Склад і витрати компонентів горючої газової суміші

Компоненти горючої суміші	Витрати газів, м ³ /год
1-а камера	
O ₂	3,9
Повітря	0,1
C ₃ H ₈	0,71
2-а камера	
O ₂	3,6
Повітря	0,11
C ₃ H ₈	0,66

має зберегти відкриту пористість. Як зазначалося вище, ще одна проблема, з якою доводиться стикатися в процесі газотермічного напилення покриттів на тонкостінні й ажурні вироби, – це великий тепловий потік, що призводить до перегріву виробу. Проведено серію експериментів з визначення впливу дистанції напилення на процес осадження керамічного покриття на пористій матриці. Дистанцію змінювали в межах 100...200 мм при незмінних інших технологічних параметрах. На відстані до 200 мм швидкість порошку досягає максимального значення за незначного зменшення максимальної температури нагрівання порошинки [8]. На великих дистанціях температура і швидкість продуктів згоряння також знижуються, що призводить до зменшення газодинамічного і теплового впливу на тонкі стінки пор матриці. В результаті проведених експериментів встановлено, що при заданих технологічних параметрах напилення БКДП і додаткового повітряного охолодження мінімальна відстань від зрізу сопла до поверхні, при якому не відбувається руйнування і перегрів матриці, становить 180 мм. Нанесення керамічного покриття на пористі матриці здійснювали з шестиразовим перекриттям доріжок напилення. Зовнішній вид виробу з покриттям представлено на рис. 3.

При напиленні покриття повторює рельєф поверхні та не знижує поверхневу проникність матриці (рис. 4, *a*). Товщина покриття на поверхні матриці становить в середньому 100 мкм. На поперечному зламі матриці помітно, що внаслідок відбиття від перетинок покриття формується не лише на поверхні, а й на стінках приповерхневих пор матриці та досягає товщини 20 мкм.

Мікротвердість шару кераміки становить $1320 \pm 25 HV_{0,025}$, пористість нижче 2 %. Значення вимірів мікротвердості по шару мають малу розбіжність, що свідчить про однорідність шару деформованих порошинок, які щільно прилягають, так і про його фазову й структурну однорідність. Покриття прилягає до матриці без дефектів і відшарувань. З огляду на високотемпературні умови (вище ніж 1400...1450 °C) формування на тонких стінках пор покриття із Al_2O_3 можна стверджувати, що його фазовий склад представлено переважно $\alpha-Al_2O_3$ модифікацією [9]. Елементний склад матеріалу матриці й покриття, визначений методом аналізу спектрів характеристичного рентгенівського випромінювання (рис. 5), наведено в табл. 2. Теплопровідність покриття Al_2O_3 в робочому температурному діапазоні ІЧ пальника (до 1300 °C) становить в середньому 6 Вт/(м·К), а фехралевого

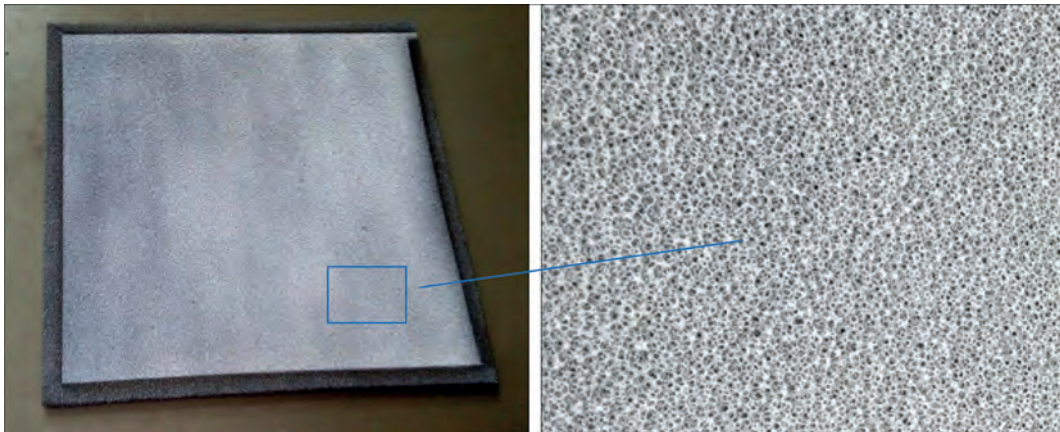


Рис. 3. Пориста матриця з покриттям

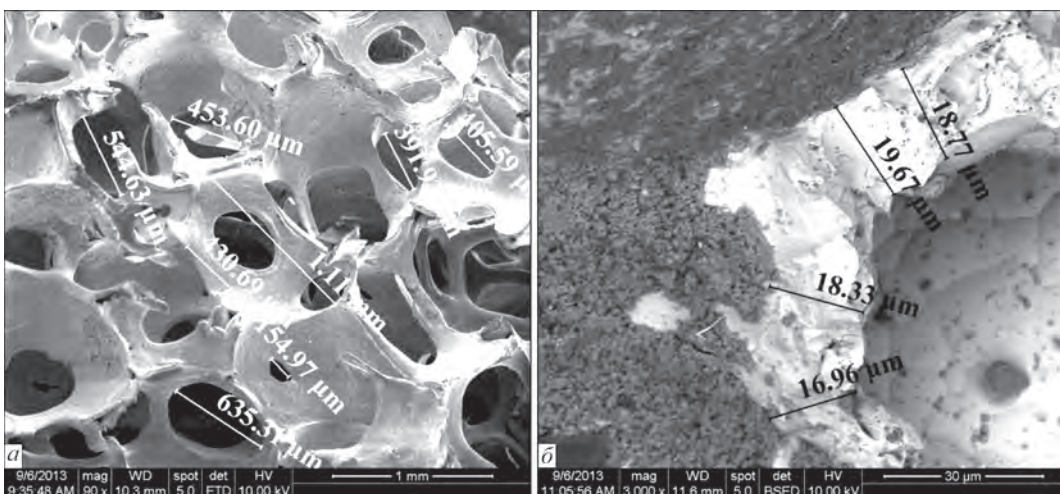


Рис. 4. Матриця після напилення: *a* – вид пор на поверхні; *б* – покриття на стінках пор на глибині 2 мм від поверхні матриці

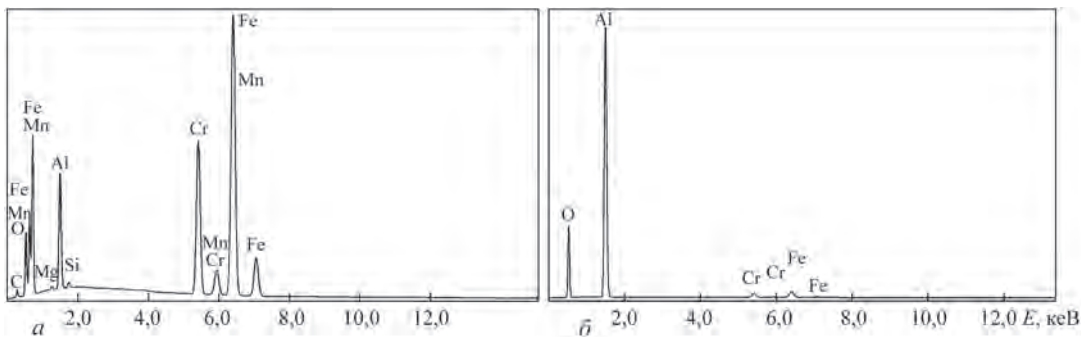


Рис. 5. Спектр характеристичного рентгенівського випромінювання матеріалу матриці (а) і покриття (б)

Таблиця 2. Елементний склад пористої матриці та покриття, мас. %

Елемент	Пориста матриця	Покриття
O	3,57	33,53
Al	9,25	59,27
Cr	20,69	2,43
Fe	64,11	4,78
Mn	1,28	
Mg	0,34	
C	0,37	
Si	0,39	

матеріалу пористої матриці – 16 Вт/(м²·К). Різниця в теплопровідності, як показано нижче, впливає на сам процес горіння горючої суміші.

Випробування пористих матриць з покриттям і без проведено в роботі [10]. Горіння сумішей природного газу з повітрям на поверхні пористих матриць з керамічним покриттям випробовували при варіюванні питомого теплового навантаження. Вимірювали радіаційну температуру поверхні ділянок без і з покриттям, а також відповідні температури на зворотному боці матриці. Видиме світіння поверхні ділянки вихідної матриці без покриття було яскравішим, ніж ділянки з керамічним покриттям. Однак температури поверхні ділянок, виміряні пірометром, виявилися прямо протилежними. Температура поверхні з керамічним покриттям була приблизно на 200 К вище. Таку істотну різницю температур можна пояснити тим, що в ділянці матриці з покриттям внаслідок зменшення коефіцієнта теплопровідності поверхні фронт полум'я проникає глибше в пори матриці, збільшується площа контакту реакційної зони з поверхнею пор. Температура підповерхневого шару матриці підвищується. Радіаційний пірометр реєструє збільшену температуру, оскільки керамічне покриття прозоре в широкому спектрі ІЧ випромінювання. В матрицях з керамічним покриттям зона полум'я переміщується в пори нижче від поверхні матриці, відбувається перерозподіл енергії, що виділяється при згорянні газової суміші. Випромінювана поверхнею енергія зростає. Температура продуктів згорання та енергія, що вноситься продуктами згорання, зменшуються.

В результаті перерозподілу енергії радіаційний коефіцієнт корисної дії пального при нанесенні кера-

мічного покриття збільшується. Ефективність випромінювання матриці з керамічним покриттям вища до 2 разів у спектральному діапазоні довжини хвиль від 5 до 14 мкм. Зменшується також кількість шкідливих викидів у продуктах згорання (чадного газу – в 2 рази, оксиду азоту – на 10...15 %).

При збіднінні суміші (збільшенні коефіцієнта надлишку повітря) температури поверхневого шару і зворотного боку обох ділянок матриці монотонно падають, що пов'язано зі зменшенням калорійності суміші. Тут також температури матриці з керамічним покриттям вищі у всьому діапазоні зміни параметрів надлишку повітря. Таким чином, на відміну від поверхневого горіння на пористій металевій матриці при нанесенні на її поверхню тонкого шару кераміки відбувається зміна режиму горіння. Фронт полум'я проникає в матрицю на невелику глибину за плівку покриття і температура його значно зростає. Відбувається перерозподіл енергії, отриманої завдяки згорянню горючої суміші. Оскільки температура поверхневого шару матриці стає вищою, це призводить до підсилення радіаційного потоку і одночасно знижується температура продуктів згорання, що повинно вести до зниження швидкості утворення оксидів азоту й монооксиду вуглецю.

На ділянці матриці з керамічним покриттям при високому тепловому навантаженні утворення оксидів азоту знижується в 2 рази. При розбавленні суміші повітрям вміст монооксиду вуглецю й оксидів азоту монотонно падає. Близько до межі поверхневого горіння за щільності потужності 33 Вт/см² концентрація монооксиду вуглецю становить лише ~10 ppm, а концентрація оксидів азоту – близько 3 ppm. Експерименти показали, що завдяки керамічному покриттю підвищилася термічна міцність матриці, розширилися концентраційні межі поверхневого горіння, що дозволяє продовжити термін служби пористих металевих матриць і зменшити матеріалоемність пального пристроїв.

Висновки

1. Детонаційним методом із використанням БКДП нанесено покриття з оксиду алюмінію на поверхню пористої матриці зі збереженням її поверхневої проникності.

2. Наявність керамічного покриття з меншим коефіцієнтом теплопровідності, ніж у матеріалі матриці, змінює режим горіння горючої газової суміші. Фронт полум'я проникає в матрицю на невелику глибину за шар покриття, що забезпечує покращення технічних характеристик ІЧ пальників.

3. Використання в ІЧ пальниках пористої матриці з керамічним покриттям дозволяє збільшити коефіцієнт корисної дії пальника й зменшити кількість шкідливих викидів у продуктах згоряння (чадного газу – в 2 рази, оксиду азоту – на 10...15 %) і значно підвищити ресурс роботи пальника.

Список літератури/References

1. Srivastava, V.S., Sahoo, K.L. (2006) Metallic Foams: Current Status and Future Prospects. *Materials Science*, **9**, 4, 9–13.
2. Shmelev, V. (2013) Limiting conditions for the combustion of a rich gas mixture on the surface of a permeable matrix. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, **7**, 1, 23–34. <https://doi.org/10.1134/S1990793113010120>
3. Xiao-Hong Han, Qin Wang, Young-Gil Park et al. (2012) A Review of Metal Foam and Metal Matrix Composites for Heat Exchangers and Heat Sinks. *Heat Transfer Engineering*, **33**, **12**, 991–1009. <https://doi.org/10.1080/01457632.2012.659613>
4. Тюрін Ю.М., Колісниченко О.В. (2008) Заявник та патентовласник Ю.М. Тюрін, О.В. Колісниченко. *Спосіб детонаційного напылення покриття і прилад для його здійснення*. Державний реєстр патентів України, Київ, Україна, Пат. 83831.
5. Tyurin, Yu.M., Kolisnichenko, O.V. (2008) *Method of detonation spraying of coatings and device for its realization*. Pat. 83831, Ukraine [in Ukraine].
6. Колісниченко О.В., Тюрін Ю.М., Товбін Р. (2017) Ефективність процесу напылення покриттів с использованием многокамерного детонационного устройства. *Автоматическая сварка*, **10**, 28–34. <https://doi.org/10.15407/as2017.10.03>
7. Колісниченко, О.В., Тюрін, Ю.М., Товбін, Р. (2017) Efficiency of process of coating spraying using multichamber detonation unit. *The Paton Welding J.*, **10**, 28–34. <https://doi.org/10.15407/as2017.10.03>.
8. Salimi Jazi, H.R., Mostaghimi, J., Chandra, S. et al. (2009) Spray-Formed, Metal-Foam Heat Exchangers for High Temperature Applications. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, **1**, 3, 031008. <https://doi.org/10.1115/1.4001049>
9. Hafeez, P., Yugeswaran, S., Chandra, S. et al. (2016) Fabrication of High-Temperature Heat Exchangers by Plasma Spraying Exterior Skins on Nickel Foams. *Journal of Thermal Spray Technology*, **25**, **5**, 1056–1067. <https://doi.org/10.1007/s11666-016-0413-9>
10. Sun, B., Fukanuma, H., Ohno, N. (2009) The Influence of Spray Parameters on the Characteristics of Al₂O₃ Particles and Coatings Sprayed by Detonation Spray. *ITSC 2009: proceedings from the 2009 International Thermal Spray Conference, May 4–7, 2009, Las Vegas, Nevada*, 830–835.
11. Kovaleva, M., Tyurin, Yu., Vasilik, N. et al. (2013) Deposition and characterization of Al₂O₃ coatings by multi-chamber gas-dynamic accelerator. *Surface & Coatings Technology*, **232**, 719–725. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.06.086>
12. Shmelev, V. (2014) Surface Burning on a Foam Metal Matrix with the Ceramic Coating. *Combustion Science and Technology*, **186**, **7**, 943–952. <https://doi.org/10.1080/00102202.2014.890601>

DEPOSITION OF CERAMIC COATING ON THE SURFACE OF A POROUS MATRIX OF INFRARED GAS TORCH

O.V. Kolisnichenko, Yu.M. Tyurin, M.A. Poleshchuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

A technology is proposed for deposition of ceramic coating on the surface of Fe-chr porous matrix to improve the performance of infrared torches. Multichamber detonation device allows forming coatings on the working surface without any significant changes of its surface permeability. Presence of Al₂O₃ ceramic coating on the pore walls changes the burning mode. The flame front moves into the matrix to a small depth behind the coating film that leads to reduction of harmful emissions at fuel mixture combustion: carbon monoxide gas to the maximum, nitrogen oxide by 10...15 %. The effectiveness of matrix radiation increases up to 2 times in the spectral infrared range of wave length from 5 to 14 μm. 10 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: porous metal matrices, infrared radiation, detonation spraying, ceramic coatings, harmful emissions, radiation effectiveness

Надійшла до редакції 26.07.2022

НОВА КНИГА



Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В. Аргондугове та електронно-променеве зварювання псевдо-β титанового сплаву BT19. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2022. — 128 с.

В монографії розглянуто особливості зварювання псевдо-β титанових сплавів методами аргондугового (АДЗ) та електронно-променевого (ЕПЗ) зварювання. Методами математичного моделювання визначено вплив термічного циклу зварювання на фазовий склад металу зварного шва і зони термічного впливу зварного з'єднання при АДЗ вольфрамовим електродом псевдо-β титанового сплаву BT19. Побудовано діаграму анізотермічних перетворень при охолодженні псевдо-β титанового сплаву та розрахунково-експериментальним методом визначено залежність залишкової кількості β-фази від швидкості охолодження. Розроблено технологію АДЗ із застосуванням присадного дроту або безкисневих флюсів та технологію ЕПЗ с попереднім підігрівом і локальною термічною обробкою. Встановлено залежність міцності з'єднань сплаву BT19, виконаних ЕПЗ, від кількості β-фази в металі шва. Наведено результати досліджень впливу різних видів пічної термічної обробки зварних з'єднань сплаву BT19 на їх структурно-фазовий склад та механічні характеристики. Застосування зазначених технологій зварювання сприятиме більш широкому використанню зварних конструкцій з псевдо-β титанових сплавів в енергетичному та хімічному машинобудуванні, а також в авіакосмічній галузі промисловості. Для наукових та інженерно-технічних працівників, а також студентів металургійних спеціальностей.

Книгу можна замовити в редакції журналу.