УДК 621.791

Р. М. Губа[1], А. А. Троян[2], С. Ю. Ославський[2], А. Є. Кашаба[3], С. Ю. Асмоловський[4]

[1]Український державний університет науки і технологій

[2]Space Electric Thruster Systems (SETS)

[3]Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут"

[4]Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ОТРИМАННЯ ПРОМІЖНИХ ШАРІВ ПРИ ПАЯННІ ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ ТА ВОЛЬФРАМУ

Перспективним конструкційним матеріалом для виготовлення деталей термоемісійних катодів є вуглець-вуглецевий композитний матеріал (ВВКМ). Такий матеріал характеризується значною стійкістю до впливу термічних напружень, низькою щільністю, високою корозійною стійкістю, високою температурою сублімації, стійкістю до термоударів, високою механічною міцністю за температур до 2800 ˚С [1]. Електричні властивості ВВКМ дають можливість використовувати його як матеріал для виготовлення резистивних нагрівачів [2], деталей, що слугують струмопідводами та деталей конструкції емітера. Паяні з’єднання деталей катоду, що виготовленні з ВВКМ працюють за температур 1400-1700 ˚С, в умовах високих термомеханічних навантажень в середовищі вакууму. Термін роботи таких деталей визначає час роботи всього двигуна, тому збільшення цього терміну є важливим завданням для забезпечення надійності всієї рухомої установки.

Значною проблемою використання ВВКМ є отримання якісного з'єднання з металами, працездатне за температур 1400-1700 ˚С. Для деталей катодів, виготовлених з ВВКМ не рекомендовано використання таких типів фіксації як різьбова, клепана із-за крихкої природи ВВКМ та необхідності отримання герметичних з’єднань. Висока робоча температура з'єднань перешкоджає використанню клейових композицій [3]. Таким чином, паяння, стає одним із найбільш ефективних методів з’єднання деталей з ВВКМ між собою та з металами.

Формування з'єднання вуглецевих матеріалів з металами за участю рідкої фази є найбільш поширеним способом паяння та зварювання. При цьому можливі різні варіанти матеріалу формуючого - від металевого до карбідного та вуглецевого складів, а також проміжних складів з різним вмістом металевої карбідної та вуглецевої фаз [4].

ВВКМ, що застосовується в конструкції катодів має 3D структуру армування вуглецевими волокнами, які ущільнені вуглецем. Така конфігурація дозволяє отримувати показники щільності 1,12…1,36 г/см^3, відкритої пористості 12,2…24,1 % [8]. Мікроструктура ВВКМ являє собою розгалужену систему капілярів, що мають різну геометрію та розміри: 10…70 мкм у поздовжньому напрямку волокон та до 0,5 мм у поперечному напрямку. Така структура ВВКМ сприяє втягуванню металічного пропою при паянні, утворюючи в порах ВВКМ металічний каркас, характеристики міцності якого і визначають, як правило, міцність паяного з'єднання [4].

При контактно-реакційному паянні тонкостінних (товщина стінки до 1 мм) циліндричних деталей з ВВКМ та вольфрамом з використанням порошкових припоїв надмірне капілярне втягування разом с усадкою порошкового припою спричиняють утворення дефектів паяного з'єднання у вигляді непропаю і порожнин, тому актуальним питанням є розробка композиційної суміші порошкових матеріалів, для попереднього нанесення на ВВКМ. Проміжний прошарок сприяє кращому змочуванню припою, сприяє значному зниженню термічних напружень та підвищенню механічних властивостей паяних з'єднань [5].

Умови роботи паяного вузла визначають вимоги до застосовуваних матеріалів припою та металізаційного прошарку [6,7]:

– змочування. Матеріал повинен змочувати ВВКМ (кут $\theta < 90^\circ$) та утворювати з'єднання за рахунок фази МеС-С, однак разом з тим повинен мати і обмежену швидкість розтікання, щоб сформувати рівномірний прошарок на поверхні ВВКМ.

– стійкість до фізичної абляції. Щоб уникнути активного випаровування окремих компонентів припоїв під час паяння деталей у вакуумі та під час експлуатації катоду, необхідно застосовувати такі припої, пружність пари яких мінімум на 1-2 порядки нижча за тиск робочого середовища катоду.

– температура плавлення металізаційного прошарку повинна бути вищою, ніж температура плавлення припою. Така залежність мінімізує втягуванню припою у пори та сприяє отриманню цілісного паяного шву без дефектів.

– матеріали повинні мати максимально наближені характеристики коефіцієнта термічного розширення (КТР) до основних матеріалів, що з'єднуються при паянні. Для зниження напруги під час з'єднання різнорідних матеріалів, рекомендується використання пластичних матеріалів, межа пружності яких нижча або наближається до межі міцності вуглецевого матеріалу на розтягнення.

– температурний інтервал кристалізації. Бажано, щоб хімічний склад був евтектичним або близьким до евтектичного, припої інших з'єднань повинні мати інтервал

кристалізації не більше 50 ˚С. Сплави з більшим інтервалом кристалізації схильні до ліквації та як правило, не забезпечують отримання надійних герметичних паяних з’єднань.

Встановлено, що застосування суміші порошкових матеріалів системи Ti-Nb, дозволяє отримувати на поверхні тонкостінних деталей ВВКМ прошарок, сформований методом вакуумного дифузійного насичення за температури близько 1900 ˚С з обмеженою рідкою фазою. Формування міцного з'єднання відбувається за допомогою утворення евтектичного розплаву типу МеС-С, проникнення його у ВВКМ з наступною кристалізацією [6]. Товщина прошарку становить 20…40 мкм, та складається з карбідних фаз (Ti, Nb)C, та твердого розчину β-(Ti, Nb).

Використання металізації ВВКМ порошками системи Ti-Nb забезпечує утримання припою в зазорі, сприяє отриманню міцного металевого зв'язку, утворенню більш поступового градієнта концентрації вуглецю під час паяння від карбідної фази до вольфраму, що покращує пластичні властивості з’єднання.

Список літератури

1. Li S., Du D., Zhang L., Song X., Zheng Y., Huang G., Long, W. (2021). A review on filler materials for brazing of carbon-carbon composites. *Reviews on advanced materials science*, 60(1), 92-111. https://doi.org/10.1515/rams-2021-0007.

2. Hurin I., Nevlyudov I., Tokarieva O. (2023). Current leads for resistive cccm heaters. *Integrated Technologies and Energy Saving*, 4, 49-57. https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.4.053.

3. Qin Y., Feng J. (2007). Microstructure and mechanical properties of C/C composite/TC4 joint using AgCuTi filler metal. *Materials Science and Engineering*: *A*, 454-455, 322-327. https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.056.

4. Prykhodko V. E., & Kulyk A. V. (2001). Analysis of physicochemical processes of graphite with metals juncture in a fluid phase. *Kosmìčna nauka ì tehnologìâ*, 7(1s), 153-157. https://doi.org/10.15407/knit2001.01s.153.

5. Wang Z. Y., Li M. N., Ba J., Ma Q., Fan Z. Q., Lin J. H., Zhong Z. X., Qi J. L., Cao J., Feng J. C. (2018). In-Situ synthesized TiC nano-flakes reinforced C/C composite-Nb brazed joint. *Journal of the European Ceramic Society*, 38(4), 1059-1068. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.11.059

6.Аникин Л.Т., Дергунова В.С., Кравецкий Т.А. Пайка и сварка графита. М.: Металлургия, 1978. 135с.

7. Гладков А.С. Пайка деталей электровакуумных приборов М.: Энергия, 1967. 288 с.

8. Дзюба В.С., Оксиюк С.В. Исследование прочности углерод-углеродных композиционных материалов в условиях температур 293...3300К при высокоскоростном нагреве. *Проблемы прочности*. 2005. № 1. С. 136-143.

УДК 669.1:620.186

Л. О. Дан, Л. О. Трофімова

Державний вищий навчальний заклад

«Приазовський Державний Технічний Університет», м. Дніпро

ТЕПЛОВИЙ ВПЛИВ НА ДОДАТОК ЗЛИВКА, ЩО ТВЕРДНЕ, ЯК СПОСІБ ЗМЕНШЕННЯ ЙОГО НЕОДНОРІДНОСТІ

Не потребує доведення факт, що істотним недоліком любого сталевого зливку є хімічна неоднорідність металу в ньому. У великих зливках ступінь ліквації вуглецю коливається від 50 до 150 % і може досягати такої величини, що метал донної та головної частин зливка відповідатиме різним маркам сталі [1]. Крім вуглецю значно ліквують сірка і фосфор. Неоднорідність хімічного складу металу має результатом неоднорідність механічних властивостей готових виробів, що є неприпустимим.

В роботах академіка Н.Т. Гудцова, П.А. Дудовцева, В.О. Єфімова, а пізніше О.М. Скребцова та співробітників [1, 2, 3, 4] розглянуто періодичний характер розподілу хімічних елементів по перерізу зливка та висунуті міркування щодо його причин. Головною причиною цього явища названо періодичний характер перебігу конвекції рідкого металу в об’ємі зливка, що твердне. В цім контексті можна припустити, що зміна характеру потоків гарячого та холодного розплавів приведе до більш сприятливого розподілу хімічних елементів в тілі зливку.

Також відомо, що додаткова частина зливку не тільки живить тіло зливка розплавом під час його твердіння, а й суттєво впливає на характер конвективних потоків при цьому і тому може сприяти зменшенню хімічної неоднорідності.

В даній роботі дослідили вплив електродугового обігріву додатку 17,9 т зливку сталі 45 на характер розподілу вуглецю, сірки та фосфору в ньому.