

ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ У ВАКУУМІ ГРАФІТУ З МІДДЮ

Олексієнко С.В.¹, Ганєєв Т.Р.¹, Прибитько І.О.¹, Мартиненко В.О.²
(*ЧНТУ, м. Чернігів¹, НУК ім. адм. Макарова, м. Миколаїв²*)

Графіт знаходить широке використання в багатьох галузях промисловості, так як в ньому поєднуються багато цінних властивостей, зокрема, висока теплопровідність та термостійкість.

З'єднання графіту з міддю ускладнюється тим, що мідь в твердому та рідкому станах знаходиться в рівновазі з графітом. Розчинність графіту в твердій міді та розплаві складає 0,03 % та 0,0003% відповідно. Також дані матеріали мають велику різницю в коефіцієнтах термічного розширення ($4,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ у графіту та $16,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ у міді).

В теперішній час з'єднання міді з графітом найчастіше здійснюється через прошарок титану. Однак, як показує практика використання такої технології, навіть при проміжному значенні коефіцієнта термічного розширення титану ($8,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) не в усіх випадках вдається отримати з'єднання з високими експлуатаційними показниками. Крім того, теплопровідність титану складає значення $23,2 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, що створює бар'єр на границі з'єднання між графітом та міддю, теплопровідність яких складає значення $125-168 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ та $399 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ відповідно.

Метою роботи є розробка конструкторсько-технологічних засобів, що забезпечують мінімальний рівень залишкових напружень в зварних з'єднаннях графіту з міддю, отриманих дифузійним зварюванням у вакуумі.

В порівнянні з іншими металами, які можуть бути використані в якості проміжного прошарку при з'єднанні графіту з міддю, молібден володіє майже однаковим коефіцієнтом термічного розширення з графітом – $4,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, та порівняно високою теплопровідністю – $151,7 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Сплав графіт-молібден при евтектичній температурі володіє взаємною розчинністю на рівні 1,1 % (ат.).

Для отримання якісних з'єднань графіту з молібденом, який надалі при зварюванні з міддю виконує роль проміжного прошарку, розроблено основи технології електродугової металізації поверхні графіту молібденом, яка передбачає використання непокритих електродів з молібдену марки МЧВП, постійного струму прямої полярності, аргону в якості захисного газу.

При з'єднанні ж міді з молібденом також існують труднощі, пов'язані з низькою взаємною розчинністю і відсутністю твердих розчинів. Встановлено, що застосування іонної обробки шару міді, нанесеного напиленням на поверхню молібдену, створює в приконтатному об'ємі молібдену модифікований міддю шар. Це дозволяє на порядок підвищити коефіцієнт масопереносу в порівнянні із зварюванням молібдену з міддю напряму за рахунок впровадження міді в молібден та утворення вакансій в приконтатному об'ємі молібдену.

Дослідження напружено-деформованого стану виконували методом комп'ютерного моделювання на вузлах типу циліндр-циліндр з використанням ліцензійного програмного комплексу ANSYS (10 версія). Встановлено, що ступінь зниження залишкових напружень розтягу на зовнішній поверхні графіту, зменшуючи ймовірність утворення в ньому тріщин при охолодженні вузла, збільшується з ростом товщини молібденового прошарку – зі 106 МПа при відсутності прошарку до 26, 17 і 9 МПа при товщині прошарку 0,5, 1 і 3 мм відповідно.

Розроблено технологію дифузійного зварювання у вакуумі графіту з міддю, яка передбачає електродугову металізацію графіту молібденом, наступне термічне вакуумне напилення міді на молібден, модифікування поверхні молібдену міддю за рахунок низькоенергетичної іонної обробки з наступним зварюванням в твердій фазі на режимі $T_{зв} = 1123 \text{ K}$; $P_{зв} = 5,0 \text{ МПа}$; $t_{зв} = 600 \text{ с}$ при величині розрідження $p = 1,33 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$. Міцність з'єднань при випробуванні на зріз складала 32 МПа.