

УДК 621.791.927.5-023

Молочков Д.Є., аспірант
Куликовський Р.А., канд. техн. наук, доцент
Національний університет «Запорізька політехніка», dmolochkov@gmail.com

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ ДРОТУ НА НЕРІВНОМІРНІСТЬ ПОВЕРХОНЬ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ, ВИРОЩЕНИХ МЕТОДОМ WAAM

Технологія Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) має великий потенціал зниження витрат на матеріали та скорочення часу виробництва одиночних деталей або їх невеликих серій. Однак, у порівнянні з механічною обробкою фрезеруванням або сплавленням порошку, поверхні деталей, виготовлених за технологією WAAM, мають виражену хвилястість від 0,15 до 1,0 мм. Така геометрія поверхні обмежує можливості дизайну та застосування деталей у необробленому вигляді, і тому вони потребують додаткової обробки. Зменшення обсягу механічної обробки під час виробництва середніх і великогабаритних деталей дозволить прискорити процес виробництва, знизити витрати на ріжучий інструмент, електроенергію та спростити етапи виробництва.

Хвилястість поверхонь, утворених внаслідок пошарового наплавлення і кристалізації металу, а також дефекти нанесення металу, потенційно можуть впливати на механічні властивості деталей, тому їх слід враховувати при аналізі та проектуванні конструкцій [1]. Нерівномірність поверхонь є однією з причин анізотропії механічних властивостей деталей і призводить до зниження границі міцності, умовної границі плинності $\sigma_{0,2}$ та зниження модуля Юнга до 20% для поперечних зразків у порівнянні з поздовжніми зразками [2-4].

Водночас, окрім типової хвилястості, при WAAM можуть виникати нетипові відхилення геометрії бічних поверхонь виробу, пов'язані зі зношуванням контактного наконечника. Флуктуації та зміна відносного положення присадного дроту, спричинені його кривизною та зношуванням контактного наконечника, збільшують хвилястість поверхонь деталей та є причиною значних відхилень від площинності бічних поверхонь виробу. При заміні зношеного наконечника на новий, дріт повертається в початкове положення. Таким чином, періодична зміна положення дроту призводить до відхилень геометричних параметрів від номінальних.

Зсув бічних поверхонь виробу, які формуються в процесі вирощування, викликає проблеми не лише з правильним позиціонування окремих вирощуваних елементів, але й з нерівномірним розподіленням напружень при стискаючих і розтягуючих навантаженнях. На прикладі двох зразків (рис. 1, а), вирощених за однакових умов з нелегованого сталюого дроту марки ER70S-6, можна спостерігати вплив цього дефекту, що виникає після заміни зношеного наконечника.

Моделювання випробування на розрив методом скінченних елементів при навантаженні 23 кН показало, що в контрольному зразку (рис. 1, г) виникають рівномірно розподілені напруження з максимальним значенням 293 МПа. Напруження в зразку, виготовленого методом WAAM без зсуву та в аналогічному зразку із зсувом, перевищують контрольний зразок відповідно на 42% та 67%. При цьому, залишкова деформація зразка із зсувом при розтягуванні складає 0,5%. Через характерну хвилястість поверхні, зразок без зсуву має зниження витривалості при циклічному навантаженні до 1380 циклів порівняно з 16350 для контрольного зразка.

Моделювання випробування стискання з силою 23 кН показало, що максимальні напруження в контрольному зразку не перевищують 293 МПа. Через дефекти геометрії бічних поверхонь, напруження в зразку без зсуву та в зразку із зсувом становлять відповідно 48% та 64% від контрольного зразка. Зразок без зсуву витримує до 1300 циклів при циклічному навантаженні, тоді як контрольний зразок зберігає цілісність до 16400 циклів.

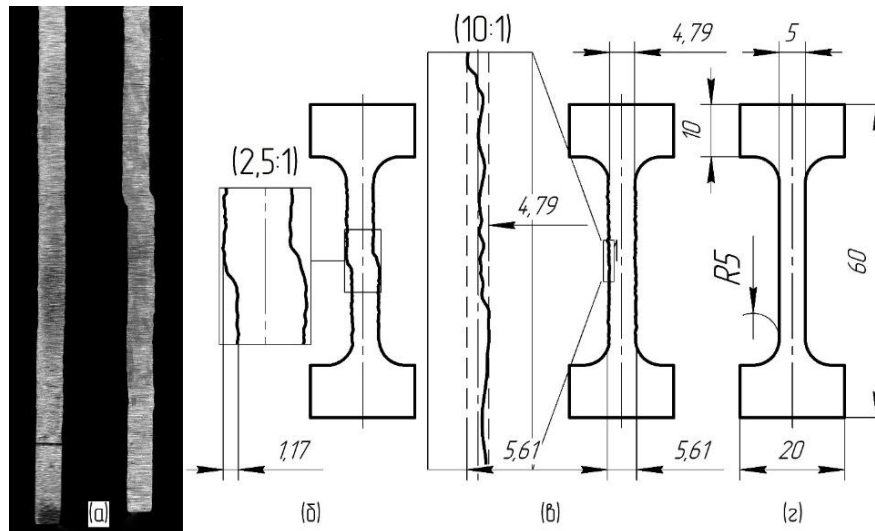


Рис. 1 – Скановані зразки (а) та зразки із зсувом (б), без зсуву (в) та контрольний (г)

Дефект геометрії бічних поверхонь у вигляді зсуву стінки виробу від первинної осі, який виникає при заміні зношеного наконечника під час процесу пошарового вирощування, значно підвищує рівень напружень через ексцентриситет навантаження. У зразку з дефектом спостерігається нерівномірне розподілення напружень по перерізу, що призводить до зниження ефективності використання матеріалу. При стискаючому навантаженні, ексцентриситет навантаження створює дестабілізуючу дію, яка разом з перевищенням границі плинності в зонах, де утворилися концентратори напружень, веде до деформування стінки виробу при різних видах навантажень. Особливо критично досліджений дефект впливає на витривалість деталей при циклічному навантаженні.

Таким чином встановлено, що утворення подібних дефектів при вирощуванні тонкостінних виробів методом WAAM є неприпустимим, оскільки елементи конструкції зазвичай проєктуються для експлуатації в умовах навантаження, що не перевищують межі пружної деформації, або з урахуванням виконання певних вимог щодо жорсткості, за винятком випадків, коли елементи конструюються спеціально для пластичного руйнування при ударному навантаженні. Запобігання можливого зниження витривалості шляхом збільшення перерізу конструкційних елементів знизить ефективність використання матеріалу виробу. Крім того, вплив такого дефекту має бути досліджено для кожної окремої конструкції, яка має специфічний профіль та індивідуальні граничні умови роботи.

Зношування контактного наконечника є невідоротним і поступовим процесом, внаслідок якого присадний дріт змінює відносне положення і, відповідно, змінюється місце нанесення матеріалу. Дослідивши швидкість зносу контактних наконечників за різних параметрів вирощування, можна оптимізувати періодичність їх заміни та передбачити відносне відхилення дроту при створенні траєкторії вирощування виробу. Зменшення розмірів та кількості геометричних дефектів допоможе зменшити кількість постобробки, прискорити та здешевити виробництво.

Список посилань

1. Laghi V., Palermo M., Gasparini G., Alena Girelli V., Trombetti T. Geometrical Characterization of Wire-and-Arc Additive Manufactured Steel Element. *Advanced Materials Letters*. 2019. Вип. 10, № 10. С. 695–699. <https://doi.org/10.5185/amlett.2019.0019>
2. Laghi V., Palermo M., Gasparini G., Girelli V. A., Trombetti T. Experimental results for structural design of Wire-and-Arc Additive Manufactured stainless steel members. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. Вип. 167. С. 105858. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105858>
3. Hadjipantelis N., Weber B., Buchanan C., Gardner L. Description of anisotropic material response of wire and arc additively manufactured thin-walled stainless steel elements. *Thin-Walled Structures*. 2022. Вип. 171, № February. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108634>

4. Laghi V., Palermo M., Gasparini G., Girelli V. A., Trombetti T. On the influence of the geometrical irregularities in the mechanical response of Wire-and-Arc Additively Manufactured planar elements. Journal of Constructional Steel Research. 2021. Вип. 178. С. 106490. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106490>

УДК 621.791.76/79

Гущин К.В.
Зяхор І.В., канд. техн. наук
Завертанний М.С., канд. техн. наук
Самотрясов С.М.
Наконечний А.О.

Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, м. Київ, zyakhor2@ukr.net

ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ ПРОМІЖНОЇ ВСТАВКИ НА ЕТАПІ НАГРІВАННЯ ОПОРОМ ПРИ КОНТАКТНОМУ СТИКОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ДЕТАЛЕЙ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Контактне стикове зварювання (КСЗ) оплавленням є ефективною технологією одержання нероз'ємних з'єднань при виготовленні силових елементів літальних апаратів із алюмінієвих сплавів. Цей спосіб зварювання забезпечує високу стабільну якість з'єднань, об'єднує в єдиному циклі складальні та зварювальні операції та не вимагає застосування допоміжних витратних матеріалів [1-4].

При зварюванні заготовок алюмінієвих сплавів товщиною до 10...12 мм технологія КСЗ забезпечує високі показники міцності та якісне (бездефектне) з'єднання при незначній ширині зони термічного впливу (ЗТВ) [5]. При КСЗ профілів більшої товщини необхідно здійснювати попередній підігрів заготовок опором за рахунок пропускання електричного струму високої щільності з подальшим переходом до етапу оплавлення. При КСЗ термічно зміцнених алюмінієвих сплавів, застосування попереднього підігріву призводить до збільшення ширини ЗТВ та втрати міцності металу в цій зоні.

Підвищення ефективності попереднього підігріву опором, зменшення його тривалості та втрати енергії на нагрівання зварювального контуру є актуальною проблемою, вирішення якої забезпечить суттєву економію енергії та підвищення механічних властивостей зварних з'єднань виробів із термічнозміцнених алюмінієвих сплавів.

Мета роботи – встановити можливість підвищення ефективності попереднього підігріву опором при КСЗ алюмінієвих сплавів за рахунок інтенсифікації та локалізації процесу тепловиділення в зоні контакту заготовок.

Запропоновано технологічну концепцію КСЗ оплавленням з попереднім підігрівом опором з використанням комбінованої проміжної вставки із шарів матеріалів з високим електричним опором та високою теплопровідністю, що забезпечує концентрацію виділення тепла в стику між деталями та його рівномірний розподіл по перетину.

Дослідження процесу нагрівання проводили з використанням машини для стикового зварювання типу K607. Діапазон зміни щільності струму складав 7,5...15 А/мм², а часу нагрівання 40...60 с. Використовувались заготовки із алюмінієвого сплаву 1201 товщиною 30 мм. Комбінована вставка виготовлялась шляхом наплавлення шарів міді товщиною 3 мм з двох сторін пластини із сталі 12X18H10T товщиною 6 мм. Дослідження температурних полів здійснювались за допомогою комп'ютеризованої системи реєстрації температури на базі 8-канального USB-модулю для термопар Advantech USB-4718 з використанням термопар хромель-алюмель $\varnothing 0,5$ мм.

Результати експериментів свідчать про значний ефект використання комбінованої вставки при нагріванні опором – суттєво підвищується градієнт температурного поля в заготовках при всіх значеннях щільності струму і часу нагрівання, які досліджувались.