УДК 621.791

МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫЕ ГИБРИДНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ WAAM И LMD

С. И. АНЦИФЕРОВ, Д. А. СЫЧЁВ, В. В. ЧЕРЕПЧЕНКО,
В. А. РОМАНЕНКО, С. В. МЕДВЕДЕВ
Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
Белгород, Россия

В последнее время в технологические процессы производств все больше стали внедряться технологии аддитивного выращивания, которые представляют собой трехмерную печать изделий на основе электронно-цифровой модели путем послойного добавления материала. Интеграция аддитивных методов послойного выращивания металла объясняется потребностью производств в повышении их гибкости и эффективности [1]. Кроме этого, методы послойного выращивания позволяют сократить отходы и снизить себестоимость изделия.

Сочетание аддитивных и субтрактивных технологий находит применение в различных областях промышленности, например в аэрокосмической, где важно получать сложные и точные детали, и в машиностроении, где в основном данные технологии применяются для ремонта поврежденных элементов.

Аддитивные технологии, в свою очередь, имеют довольно широкий ряд методов, которые различаются по принципу послойного добавления материала. Одними из таких методов являются WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) и LMD (Laser Metal Deposition) [6].

WAAM представляет собой процесс 3D-печати, в котором в качестве материала выступает металлическая проволока, а источником энергии служит электрическая дуга [2].

Существует три вида печати данным методом. Одним видом является GMAW (MIG) – дуговая сварка плавящимся электродом в среде инертного газа; другим – GTAW (TIG) – дуговая сварка неплавящимся электродом, при которой присадочная проволока подается через отдельный механизм подачи. Кроме этого, есть PAW – плазменно-дуговая сварка.

Главными преимуществами WAAM являются высокая скорость наплавки материала, высокий коэффициент использования материала, возможность создания крупногабаритных деталей, низкая стоимость проволоки в сравнении с металлическими порошками в других методах [3]. Однако есть и недостатки, к которым относятся дефекты, вызванные термическими циклами (внутренние напряжения, пористость и деформации), низкая точность, требующая обязательной механической обработки изделия.

LMD представляет собой процесс, при котором источником энергии выступает лазер, а в качестве материала используется металлический порошок (в редких случаях проволока).

Существует несколько способов послойного выращивания методом LMD. Первый предусматривает предварительное нанесение порошка и последующую его плавку лазером; другой способ основан на образовании лазером ванны расплава и последующем направлении в нее материала.

В сравнении с методом WAAM скорость осаждения у LMD меньше, выше стоимость оборудования и металлического порошка [4]. Однако есть довольно большой ряд преимуществ. LMD обеспечивает высокую точность и качество поверхности, позволяет работать с широким спектром металлов и сплавов с различными составами [5]. Благодаря этому методу можно как создавать, так и ремонтировать различные детали.

Применение аддитивных технологий для многономенклатурных гибридных производств позволяет, например, минимизировать материальные затраты. Различные методы имеют свои преимущества и недостатки. WAAM обеспечивает высокую скорость печати и позволяет изготавливать крупные детали. LMD обеспечивает высокую точность и более устойчивый термический цикл наплавки. Их сочетание позволяет производству легко подстраиваться под нужды и задачи, при этом обеспечивая высокую скорость и точность создания изделия.

Работа выполнена в рамках государственного задания FZWN-2024-0006 по теме «Разработка научных подходов и методов создания многономенклатурных гибридных производств на основе аддитивных технологий с использованием цифровых двойников».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Armstrong, M.** An overview of modern metal additive manufacturing technology / M. Armstrong, H. Mehrabi, N. Naveed // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Vol. 84. – P. 1001–1029.

2. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V / B. Wu, D. Ding, Z. Pan [et al.] // Journal of Material Processing Technology. – 2017. – № 250. – P. 304–312.

3. **Антонова, В. С.** Аддитивные технологии : учеб. пособие / В. С. Антонова, И. И. Осовская. – СПб. : ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. – 30 с.

4. **Береснев, А. Г.** Горячее изостатическое прессование для аддитивного производства / А. Г. Береснев, И. М. Разумовский // Аддитивные технологии. – 2017. – № 4. – С. 50–54.

5. Аддитивно-субтрактивные технологии – эффективный подход к инновационному производству / А. В. Киричек, О. Н. Федонин, Д. Л. Соловьев [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 8 (81). – С. 4–10.

6. Концепция многономенклатурного гибридного аддитивного производства / С. И. Анциферов, М. Г. Матусов, Д. В. Карпачев [и др.] // СТИН. – 2024. – № 9. – С. 19–23.