

ГИБКАЯ ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ЯЧЕЙКА ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Берсенева К.А.^{1,2}, Огородникова О.М.¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург;

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург

Ключевые слова: промышленный робот, гибкая производственная ячейка, планирование траектории, аддитивное производство, метод конечных элементов, тепловые деформации, компьютерное моделирование.

Аннотация. Выполнен аналитический обзор технических решений по использованию лазерных устройств и манипуляционных промышленных роботов для реализации аддитивных технологических процессов. Нерешенной проблемой остается коробление деталей, изготовленных аддитивными способами. Возможным решением является использование манипуляционных роботов и оптимизация траектории в 6-координатном пространстве. При этом оптимизацию необходимо выполнять на базе конечно-элементной компьютерной модели и параметрического описания тепловых деформаций.

A FLEXIBLE MANUFACTURING CELL FOR ROBOTIC ADDITIVE MANUFACTURING

Berseneva K.A.^{1,2}, Ogorodnikova O.M.¹

¹Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg;

²M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg

Keywords: industrial robots, flexible manufacturing cell, additive manufacturing, laser directed energy deposition, finite element method, numerical model, thermal distortion, optimization, trajectory planning, computer simulation.

Abstract. This paper presents an analytical review of technical solutions for using laser devices and manipulating industrial robots to perform additive technological processes. The problem of warping in parts produced through additive methods is still unresolved. One potential solution is to use manipulation robots and optimize trajectories in 6-coordinate space. In this case, optimization should be based on a finite element computer model and a parametric description of thermal distortions.

Разработка и внедрение гибких производственных ячеек (ГПЯ) с применением промышленных манипуляционных роботов является актуальным направлением развития аддитивного производства. Роботизированные технологические процессы позволяют повысить производительность оборудования и качество изделий за счет высокой точности движений манипуляторов и программируемой настройки технологических параметров [1].

ГПЯ на базе промышленных роботов используются для реализации такой аддитивной технологии, как «Прямой подвод энергии и материала» (Directed Energy Deposition, DED). Аддитивная технология DED применяется в

машиностроительной и аэрокосмической промышленности для изготовления сложных пространственных конструкций из металлических сплавов в условиях мелкосерийного производства, а также для ремонта и модификации дорогостоящих деталей, в частности, для нанесения на поверхность термически и химически стойких покрытий [2, 3]. При этом рабочие органы манипуляционного робота могут быть оснащены лазером (Laser Directed Energy Deposition, LDED) [4], обеспечивать нанесение металлического порошка и подачу проволоки в локальную рабочую зону. В зависимости от применяемых технических решений различают несколько способов аддитивного производства с подачей проволоки в зону плавления: электродуговая наплавка проволоки (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) [5], проволочно-лазерное аддитивное производство (Wire-Laser Additive Manufacturing, WLAM / LWAM) [6], проволочное электронно-лучевое аддитивное производство (Wire-feed Electron beam Additive Manufacturing, WEAM) [7].

Конструктивно в сборку ГПЯ дополнительно к манипуляционному роботу можно включить модуль линейного перемещения и наклонно-поворотный стол для перемещения и закрепления заготовки в процессе обработки [8, 9], систему источника тепла для сварки плавлением. Добавление внешних кинематических осей позволяет увеличить размер рабочего пространства робота и повысить гибкость при планировании траектории. При этом усложняется подготовка аддитивного производства, поскольку при создании управляющей программы потребуется учесть координацию многоагентных систем, разделение объекта печати на слои в непараллельных плоскостях, генерацию многоосевых траекторий инструмента [9].

Аддитивное производство металлических деталей связано с фазовыми превращениями и высокими температурными градиентами вследствие быстрых циклов нагрева и плавления, затвердевания и охлаждения. Это приводит к неравномерному тепловому расширению и сжатию, к возникновению внутренних напряжений [10] и, как следствие, к короблению, то есть к остаточной деформации изготовленных таким способом деталей. Деформации оказывают негативное влияние на конструктивные характеристики и точность размеров, например, при сборке. Исследовать процесс возникновения дефектов [11] и превентивно их исключить на этапе разработки технологии можно с использованием современных методов компьютерного моделирования [12].

Технологические дефекты, искажающие геометрию детали, можно разделить на дефекты плоскостности, структурные дефекты от разрушения при плавлении, искажение линейных размеров за счет коробления, трещины и расслоения. Для снижения дефектности применяют методы оптимизации технологических параметров, теплового контроля, прогнозирования и компенсации [13]. На выбор технологических параметров влияют свойства сплава; аддитивные технологии применяются для изготовления деталей из никельсодержащих (Inconel 625, Inconel 718, нитинол), титановых (Ti6Al4V) и алюминиевых сплавов [3].

В компьютерном моделировании преимущественно используется метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет прогнозировать остаточные

напряжения и деформации, возникающие в процессе аддитивного производства [14]. Компьютерное моделирование технологического процесса предполагает оценку возможных дефектов с использованием программ конечно-элементного анализа и оптимизацию технологических параметров [15] на базе расчетов нелинейного температурного поля [16]. При этом остаются открытыми многие вопросы математического моделирования тепловых деформаций и остаточных напряжений [17]. Для моделирования температурных полей и напряженно-деформированных состояний в аддитивном производстве [18] могут быть использованы российские (ЛОТОС, ФИДЕСИС, БАЗИС) и зарубежные (ANSYS, SYSWELD) программы конечно-элементного моделирования. На этапе симуляции движений манипулятора в составе ГПЯ и отладки управляющей программы до загрузки в контроллер может быть использована специализированная среда российского программного комплекса SprutCAM Robot для разработки автоматизированных технологий.

Список литературы

1. Огородникова О.М., Проничев И.М. Об опыте проектирования робототехнического комплекса для неразрушающего контроля // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – № 3. – С. 36-40.
2. Ahn D.G. Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology. 2021, vol. 8, no. 2, pp. 703-742.
3. Urhal P., Weightman A., Diver C., Bartolo P. Robot assisted additive manufacturing: A review // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2019, vol. 59, pp. 335-345.
4. Majumdar J.D., Madapana D., Manna I. 3-D Printing by Laser-Assisted Direct Energy Deposition (LDED): The Present Status // Transactions of the Indian National Academy of Engineering. 2021, vol. 6, no. 4, pp. 933-953.
5. Wu B., Pan Z., Ding D. et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement // Journal of Manufacturing Processes. 2018, vol. 35, pp. 127-139.
6. Abuabiah M., Mbodj N.G., Shaqour B. et al. Advancements in Laser Wire-Feed Metal Additive Manufacturing: A Brief Review // Materials. 2023, vol. 16, no. 5, p. 2030.
7. Osipovich K., Kalashnikov K., Chumaevskii A. et al. Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing: A Review // Metals. 2023, vol. 13, no. 2, p. 279.
8. Ding Y., Dwivedi R., Kovacevic R. Process planning for 8-axis robotized laser-based direct metal deposition system: A case on building revolved part // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2017, vol. 44, pp. 67-76.
9. Gibson B.T., Mhatre P., Borish M.C. et al. Controls and process planning strategies for 5-axis laser directed energy deposition of Ti-6Al-4V using an 8-axis industrial robot and rotary motion // Additive Manufacturing. 2022, vol. 58, p. 103048.
10. Огородникова О.М. Напряженно-деформированное состояние металла в эффективном интервале кристаллизации // Литейное производство. – 2012. – № 9. – С. 21-24.
11. Огородникова О.М. Накопление остаточных напряжений в металлических материалах при охлаждении после кристаллизации // Литейное производство. – 2014. – № 7. – С. 37-40.
12. Wang W., van Keulen F., Wu J. Fabrication sequence optimization for minimizing distortion in multi-axis additive manufacturing // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2023, vol. 406, p. 115899.
13. Qin L., Wang K., Li X. et al. Review of the Formation Mechanisms and Control Methods of Geometrical Defects in Laser Deposition Manufacturing // Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers. 2022, vol. 1, no. 4, p. 100052.
14. Sirin T.B., Kaynak Y. Prediction of residual stress and distortion in laser powder bed fusion additive manufacturing process of Inconel 718 alloy // Procedia CIRP. 2021, vol. 99, pp. 330-335.

15. Огородникова О.М. Формирование высокотемпературных дефектов в двухфазных металлических структурах // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 1-3. – С. 144-147.
16. Огородникова О.М. О параллельном вычислении температурных полей на послойной конечно-элементной сетке // Литейное производство. – 2014. – № 11. – С. 30-32.
17. Rashid A., Gopaluni A. A Review of Residual Stress and Deformation Modeling for Metal Additive Manufacturing Processes // Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers. 2023, vol. 2, no. 4, pp. 100102.
18. Bayat M., Dong W., Thorborg J. et al. A review of multi-scale and multi-physics simulations of metal additive manufacturing processes with focus on modeling strategies // Additive Manufacturing. 2021, vol. 47, p. 102278.

Сведения об авторах:

Берснев Кирилл Александрович – аспирант, инженер-исследователь;

Огородникова Ольга Михайловна – д.т.н., профессор.