
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 669 + 621.791.9

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ АДДИТИВНОГО
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ В ОБЪЕМЕ МАТЕРИАЛА**© 2024 г. Д.Л. Раков¹, *, Р.Ю. Сухоруков¹¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: rdl@mail.ru

Поступила в редакцию 12.02.2024 г.

После доработки 24.03.2024 г.

Принята к публикации 19.04.2024 г.

В статье рассматриваются особенности технических решений аддитивного изготовления деталей. В отличие от существующих решений послойного синтеза предлагается новый способ и устройство для осуществления движения рабочего инструмента в объеме порошка. Рассматриваются различные варианты исполнения, используя морфологический анализ путем построения морфологической таблицы. Это обеспечивает обоснованность предлагаемых технических и технологических решений и, следовательно, позволит повысить технический уровень и эффективность синтезируемых систем. Проведен анализ решений, которые обеспечивают менее дорогостоящее изготовление трехмерных объектов, за счет лучшей управляемости процесса, что приводит к более высокой производительности и снижению стоимости, как технологического процесса, так и оборудования. Также появляется возможность создавать более компактное, легкое и дешевое оборудование для синтеза трехмерных объектов. Предлагаемые технические решения расширяют функциональные возможности оборудования за счет осуществления как послойного (горизонтального) синтеза, так и объемного – вертикального или смешанного горизонтально-вертикального синтеза деталей.

Ключевые слова: аддитивные технологии, технические решения, морфологический анализ, синтез деталей в объеме порошка, смешанный горизонтально-вертикальный синтез деталей

DOI: 10.31857/S0235711924040084, **EDN:** OYXQHN

Введение. Развитие аддитивных технологий (АТ) является приоритетным направлением развития технологических процессов (ТП) в современном машиностроении. В настоящее время используются десятки разновидностей ТП [1] и технических решений (ТР) АТ, постоянно расширяются области применения и используемые материалы [2–7].

Наибольший интерес для промышленности имеет аддитивный синтез металлических материалов. Так АТ широко используются для синтеза хирургических титановых имплантатов [8], а также в получении изделий в авиакосмической промышленности, строительстве и других областях [9] (рис. 1).

Например, в авиастроении ряд деталей был заменен на одну, что позволило уменьшить вес конструкций на 40% [10]. Компания SpaceX также использует АТ для создания двигательных установок [11].

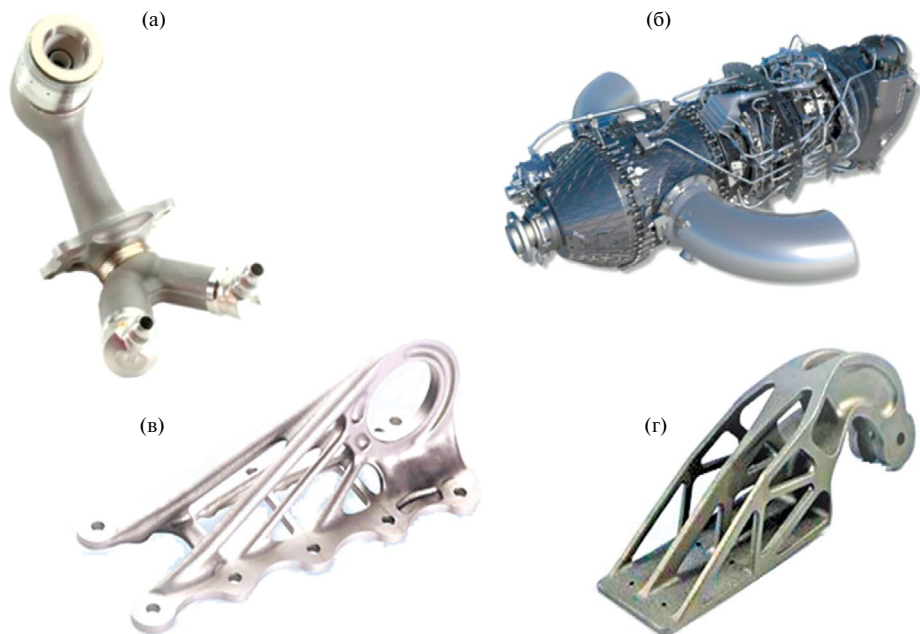


Рис. 1. Использование АТ в авиации и космонавтике [9]: (а) — форсунка; (б) — турбовинтовой двигатель; (в) — кронштейн крыла; (г) — дверная петля.

Основные направления развития аддитивных технологий. Преимущества и недостатки. В целом ряде исследований рассматриваются вопросы развития АТ [12–15]. Отмечается, что АТ имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами и имеют дальнейшее развитие: 1) исследуются процессы с использованием новых материалов, которые обеспечивают улучшенные свойства и функциональность для синтеза деталей; 2) разрабатываются технические средства для повышения скорости технологических процессов создаваемых изделий, также сокращаются сроки разработки программного обеспечения и подготовку процесса производства; 3) повышение точности и качества синтезируемых деталей. Это включает в себя разработку средств для повышения контроля качества, а также совершенствования программного обеспечения.

Аддитивные технологии имеют некоторые недостатки по сравнению с традиционными технологиями: 1) АТ имеют ограничения по типам материалов, которые можно использовать и имеют ограничения по размеру синтезируемых деталей, как правило, менее 1 м для металлических деталей; 2) традиционные методы производства позволяют более широко использовать различные свойства и номенклатуру материалов. В то время как АТ все еще развиваются в этом направлении, они пока не могут полностью конкурировать с традиционными методами.

Для классификации технических решений АТ был применен морфологический подход [13, 16], который обеспечивает обоснованность предлагаемых технических и технологических решений и, следовательно, позволяет повысить технический уровень и эффективность синтезируемых систем.

Технологический процесс аддитивного изготовления деталей в объеме материала. Обычно для послойного лазерного синтеза объемных порошковых деталей используют дозированную послойную подачу порошка на рабочий стол с обеспечением формирования слоя заданной толщины, далее осуществляют выравнивание слоя

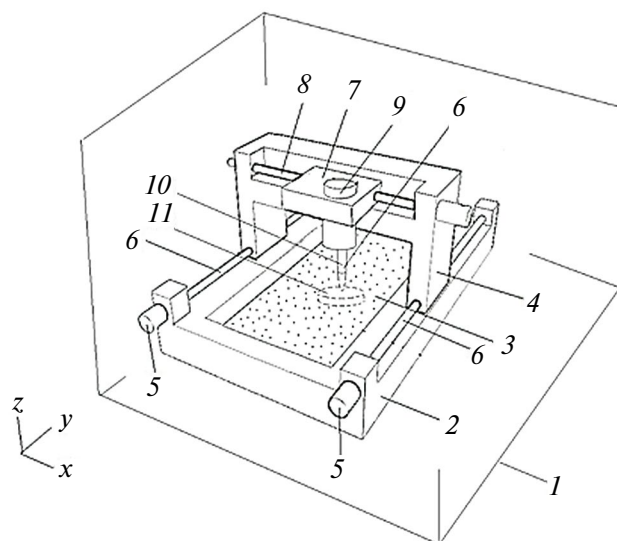


Рис. 2. Общий вид устройства.

порошка, с помощью регулируемого по высоте ножа, после чего проводят уплотнение валиком в режиме свободного качения и спекают заданные зоны лучом лазера. При этом качество спекания порошка зависит от диаметра формируемого лазерного пучка, его мощности и скорости перемещения пучка [13].

Недостатками используемых способов и устройств является малая производительность из-за низкой скорости выполнения технологических операций. Так, технологические операции и системы для выравнивания и удаления слоев ведут к снижению производительности и удорожанию оборудования. Послойный синтез позволяет осуществлять только последовательное послойное нанесение слоев и не позволяет формировать последовательно объемные поверхности.

Для устранения недостатков были разработаны способ и устройство аддитивного изготовления деталей [17]. Согласно предлагаемым техническим решениям, рабочая головка выполнена с возможностью горизонтального и вертикального перемещения относительно рабочего стола, например, при помощи механизма вертикального перемещения и кареткой, обеспечивающей горизонтальное перемещение относительно рабочего стола (рис. 2).

По сигналу с пульта автоматического управления с помощью механизма загрузки порошка на рабочий стол 2, находящийся внутри камеры 1, высыпают металлический порошок в объеме, достаточным для изготовления всего изделия. Затем камеру герметизируют и по сигналу с пульта автоматического управления из камеры откачивают воздух до остаточного давления $1 \cdot 10^{-4}$ мбар и наполняют ее аргоном до давления $1 \cdot 10^{-1}$ мбар. По сигналу с пульта автоматического управления, путем перемещения при помощи двигателей 5 по направляющим 6 портала 4 и каретки 7 по направляющей 8, установленный на каретке челнок 9 и соединенную с ним излучательную головку 10, позиционируют в горизонтальной плоскости в нужном месте рабочего стола. По сигналу с пульта автоматического управления включают источник высокоинтенсивного пучка. Затем проводят нагрев порошка 3 до заданного уровня температуры в некоторой области. В пределах этой области, опуская вниз по вертикали с помощью челнока излучательную головку 10 в массу порошка и, регулируя с пульта

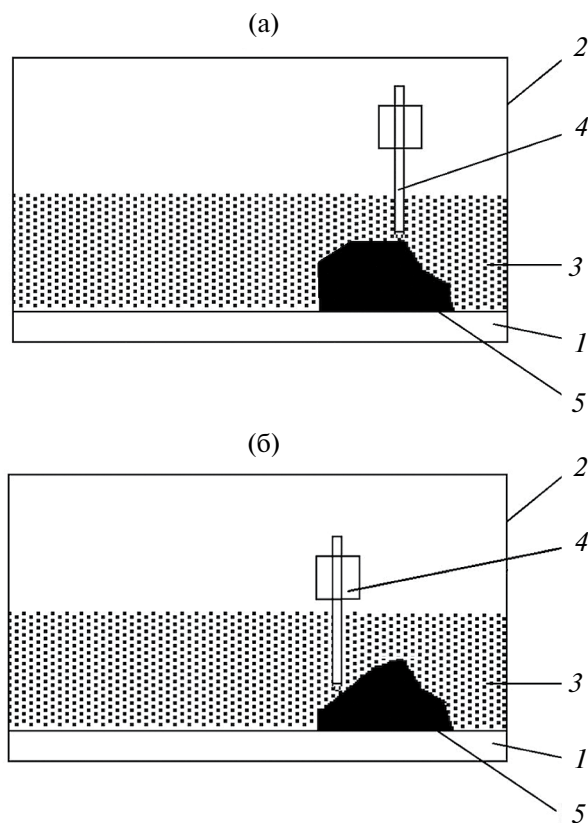


Рис. 3. Работа излучательной головки в массиве порошка а) послойном синтезе, б) горизонтально-вертикальном синтезе деталей: 1 – подложка; 2 – камера; 3 – порошок; 4 – излучательная головка; 5 – деталь.

автоматического управления процесс, ее перемещение по трем координатам при передвижении портала, каретки и челнока по заданной программе, путем селективного спекания и отверждения порошка синтезируют деталь *11*. По окончании процесса камеру охлаждают, разгерметизируют и излишки порошка выгружают с помощью механизма вывода порошка.

На рис. 3а показана работа излучательной головки в массиве порошка при послойном синтезе детали. Как видно на рисунке синтез осуществляется послойно – слой за слоем. На рис. 3б дана схема смешанного горизонтально-вертикального синтеза деталей. Как видно изготовление детали может осуществляться как послойно, как в первом примере, так и объемно – на разных высотах. Конструктивная схема дана на рис. 4.

Выводы. Предложенные ТР обладают рядом преимуществ: **1.** Меньшие масса и габариты за счет исключения устройства выравнивания порошка. **2.** Увеличенная скорость изготовления деталей, за счет исключения технологических операций движения ножа для создания слоя порошка. **3.** Адаптивность, за счет использования двух режимов синтеза, как послойного, так и горизонтально-вертикального.

Технический результат, получаемый при реализации предлагаемого способа и устройства, заключается в повышении производительности и увеличении скорости

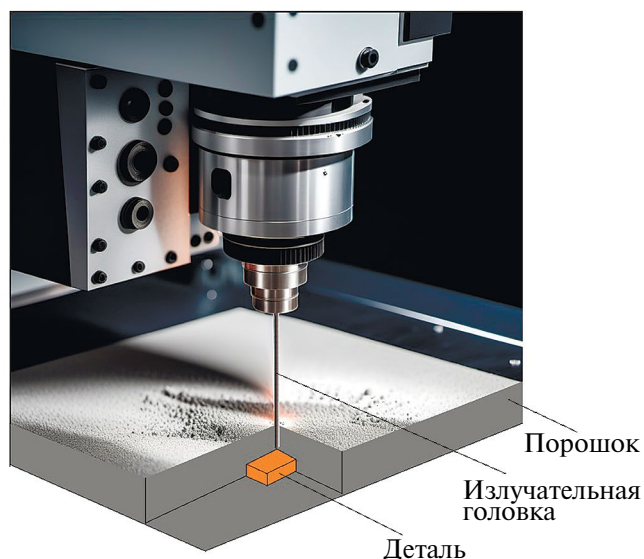


Рис. 4. Синтез детали в объеме порошка.

технологического процесса и упрощении ряда технологических операций и системы управления за счет исключения ряда технологических операций.

Предлагаемые способ и устройство расширяют функциональные возможности установки за счет осуществления как послойного (горизонтального) синтеза, так и объемного — вертикального или смешанного горизонтально-вертикального синтеза деталей.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института машиноведения им. А. А. Благонравова. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing. Texbook. New York: Springer, 2010. 459 p.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1120-9>
2. Willeme F. US Patent 43822A. Photo-Sculpture, 1864.
3. Baese C. US Patent 774549A. Photographic process for the reproduction of plastic objects, 1902.
4. Swainson W. K. US Patent 4041476. Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product, 1977.
5. Herbert A. J. Solid object generation // J. Appl. Photo. Eng. 1982. V. 8. № 4. P. 185.
6. Jamwal A., Agrawal R., Sharma M., Giallanza A. Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: a systematic review and future research directions // Appl. Sci. 2021. V. 11 (12): 5725.
<https://doi.org/10.3390/app11125725>
7. Xu X., Lu Y. Vogel-Heuser B., Wang L. Industry 4.0 and industry 5.0 — inception, conception and perception // J. Manuf. Syst. 2021. V. 61. P. 530.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>
8. Jamróz W., Szafraniec J., Kurek M., Jachowicz R. 3D printing in pharmaceutical and medical applications — recent achievements and challenges // Pharm. Res. 2018. V. 35 (9): 176.
<https://doi.org/10.1007/s11095-018-2454-x>

9. *Kellner T.* 3D-Printed ‘Bionic’ Parts Could Revolutionize Aerospace Design // General Electric Reports: Boston, MA, USA, 2017.
10. *Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., Brooks M., Pitot J., Lopez E., Leary M., Berto F., du Plessis A.* Metal additive manufacturing in aerospace: a review // *Mater. Des.* 2021. V. 209: 110008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
11. *Gradl P. R., Teasley T., Protz C., Katsarelis C., Chen P.* Process development and hot fire testing of additively manufactured NASA HR-1 for liquid rocket engine applications // In: *AIAA Propuls. Energy Forum*, 2021. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., AIAA, 2021. <https://doi.org/10.2514/6.2021-3236>
12. *Yu L., Wu S., Feng Y., Zhao C.* Development and Prospect of Additive Manufacturing Technology in Automobile Field // *Academic J. of Science and Technology*. 2022. V. 3 (3). P. 243.
13. *Rakov D., Sukhorukov R.* Analysis and prospects for the development of additive technologies for metal products // *AIP Conf. Proceedings*. AIP Publishing. 2022. T. 2533 (1): 020038.
14. *Izonin I., Tkachenko R., Gregus M., Duriagina Z., Shakhovska N.* PNN-SVM approach of Ti-based powder’s properties evaluation for biomedical implants production // *Computers, Materials & Continua*. 2022. V. 71 (3). P. 5933. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.022582>
15. *Wang L., Lu B.* Development of Additive Manufacturing Technology and Industry in China // *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*. 2022. V. 24 (4). P. 202. <https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2022.04.018>
16. *Zwicky F.* *Discovery, Invention, Research Through the Morphological Approach*. New York: McMillan, 1969.
17. *Рakov Д. Л., Сухоруков Р. Ю.* РФ Патент 2811347. Способ аддитивного изготовления деталей и устройство для его осуществления, 2024.