

**THE POSSIBILITY OF USING MODERN
ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR HEAT-RESISTANT
NICKEL ALLOYS CONSTRUCTIONS PRODUCTION***Vitaliy Rustemovich Galimov^a, Danar Ildarovich Mansurov^b*

Ufa State Aviation Technical University, Karl Marx str. 12, Ufa, 450008, Russia

^a galimov.vr@ugatu.su, ^b mdanar690@gmail.com

ABSTRACT

Additive manufacturing is a modern trend for all industries including aircraft. The article discussed additive technologies status in nowadays and their application perceptivities for aircraft engine superalloy constructions building, as well as experience of domestic and foreign colleagues of additive manufacturing usage. There are general classification features and additive technologies of metal constructions growing are reviewed. PBF- and DED-technologies technological capabilities are compared. There are main difficulties of powder technologies development in Russia is revealed during their disadvantages analysis. And wire arc additive manufacturing also called WAAM-technology is offered as alternative way. Main variants of WAAM are discussed. Perspective of WAAM-technology usage for superalloy construction building is justified by well-studied electric arc welding process. But there is a thermal influence of arc on metal may be a critical disadvantage of method. Nevertheless, the review of works with thermal effect and deposition performance estimation of DLD- and WAAM are showed that WAAM-technology is a perspective method for thermal sensitive alloys constructions production.

KEYWORDS

Additive manufacturing; wire arc additive manufacturing; WAAM-technology.

**ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ
АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ***Виталий Рустемович Галимов^a, Данар Ильдарович Мансуров^b*

Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, 450008, Уфа, ул. Карла Маркса, 12

^a galimov.vr@ugatu.su, ^b mdanar690@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Современный тренд на аддитивные технологии распространяется на все отрасли промышленности, включая авиастроение. В работе рассматривается состояние современных аддитивных технологий и перспективы их применения в отечественном авиадвигателестроении для выращивания деталей из жаропрочных никелевых сплавов, опыт отечественных и зарубежных коллег. Рассмотрены основные классификационные признаки и технологии выращивания металлических конструкций. Осуществлено сравнение технологических возможностей PBF- и DED-технологий. Анализ недостатков порошковых технологий выявил ключевые сложности развития данных методов в России. Представлен альтернативный вариант в виде проволоочно-дуговой аддитивной наплавки или WAAM-технологии. Для данного направления рассмотрены возможные варианты реализации. Обсуждение преимуществ и недостатков выявило, что перспективность развития дуговых технологий связана с опытом электродуговой сварки, тогда как критическим недостатком может стать тепловое воздействие дуги. Возможность применения способа для выращивания деталей из жаропрочных никелевых сплавов оценивалась по сравнению с технологией направленного лазерного выращивания по критериям производительности наплавки и теплового воздействия на подложку. Обзор работ, описывающих данные критерии для обоих процессов, показал потенциальную возможность развития направления WAAM-технологий для выращивания деталей из сплавов, чувствительных к нагреву.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Аддитивное производство; аддитивное электродуговое выращивание; WAAM-технология.

Введение

В современном производстве большую перспективу представляет внедрение аддитивных технологий. Современные аддитивные технологии позволяют получать изделия как из металлов, так и из неметаллических материалов и композитов.

Аддитивные технологии дают возможность значительно улучшить технологию изготовления металлических изделий со сложной геометрией, сократив время изготовления относительно применяемых технологий литья, а также уменьшив потери материала в сравнении с технологиями точения и фрезерования [1, 2]. Кроме того, аддитивные технологии могут применяться как дополнение к традиционным технологиям [3] или как ремонтная технология [4].

Большой интерес к аддитивным технологиям представляется для авиационной промышленности, где требования к материалам и технологиям их обработки непрерывно растут. Особенно это касается жаропрочных

сплавов на никелевой основе, являющихся основным материалом в газотурбинных двигателях.

В нашей стране активное развитие аддитивных технологий началось сравнительно недавно. Данная работа направлена на обзор современных аддитивных технологий и применимости их к изготовлению узлов газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов.

1. Виды аддитивных технологий

Аддитивные технологии различаются по выращиваемым материалам, принципу выращивания и источником энергии для выращивания, что требует определенной классификации (рис. 1). По методу выращивания выделяют 4 основных разновидности технологий [3, 4], из которых для металлических конструкций наибольшее применение нашли технологии Powder Bed Fusion (PBF) и Directed Energy Deposition (DED).

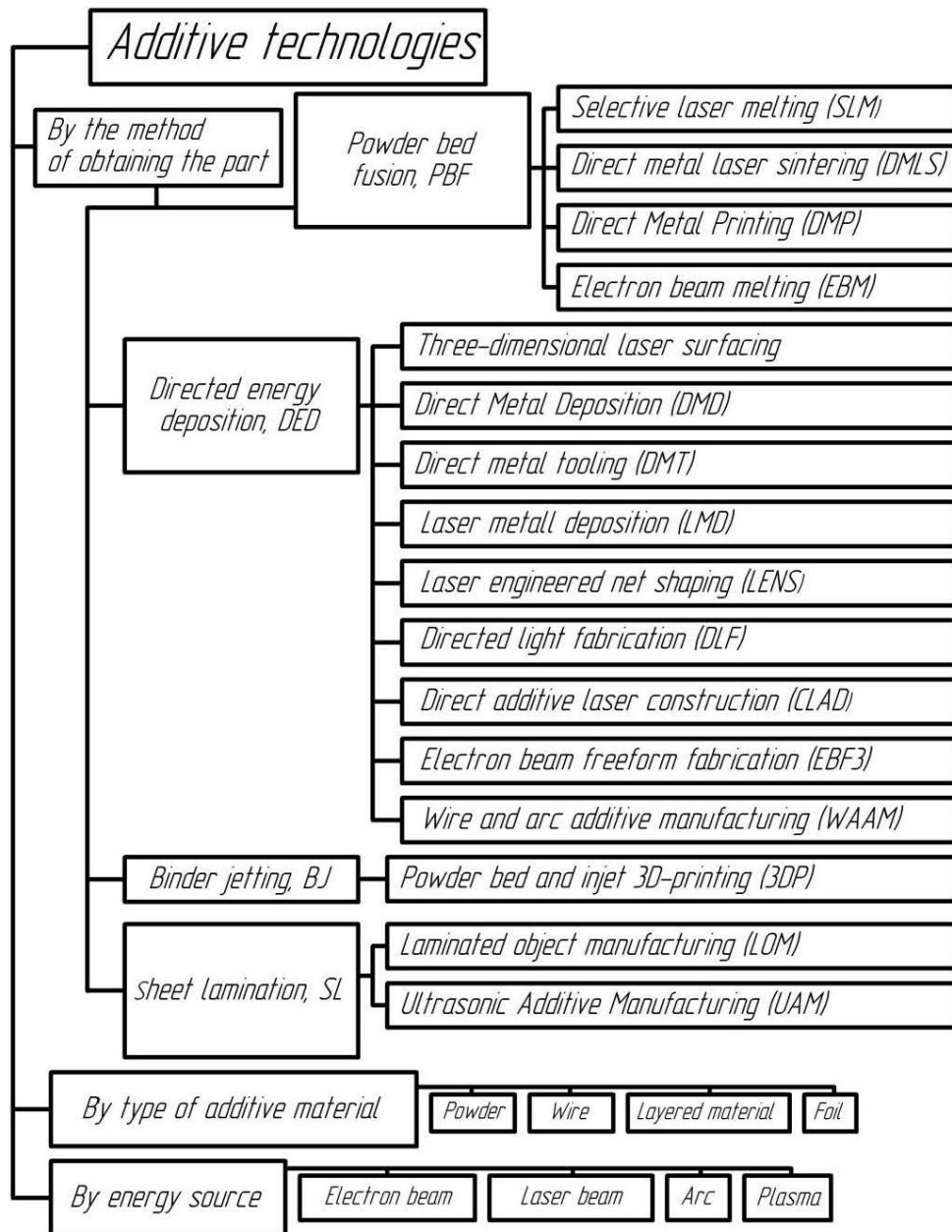


Рис. 1. Классификация аддитивных технологий

Fig. 1. Classification of additive technologies

При использовании технологии выращивания на подложке или PBF-технологии (рис. 2, а) сначала устройство нанесения слоя формирует слой металлического порошка, источник энергии (например, лазерный или электронный луч) с помощью системы зеркал перемещается по траектории в соответствии с формой выращиваемой детали, при этом порошок расплавляется. После чего расплавленный порошок затвер-

девает и формирует слой детали. Поршень опускается для нанесения следующего слоя. Данный процесс повторяется до полного построения детали.

Технологии выращивания на подложке используют в качестве материалов металлические порошки либо силикаты (перспективны в литейном производстве), керамику, а также композиты [5, 6].

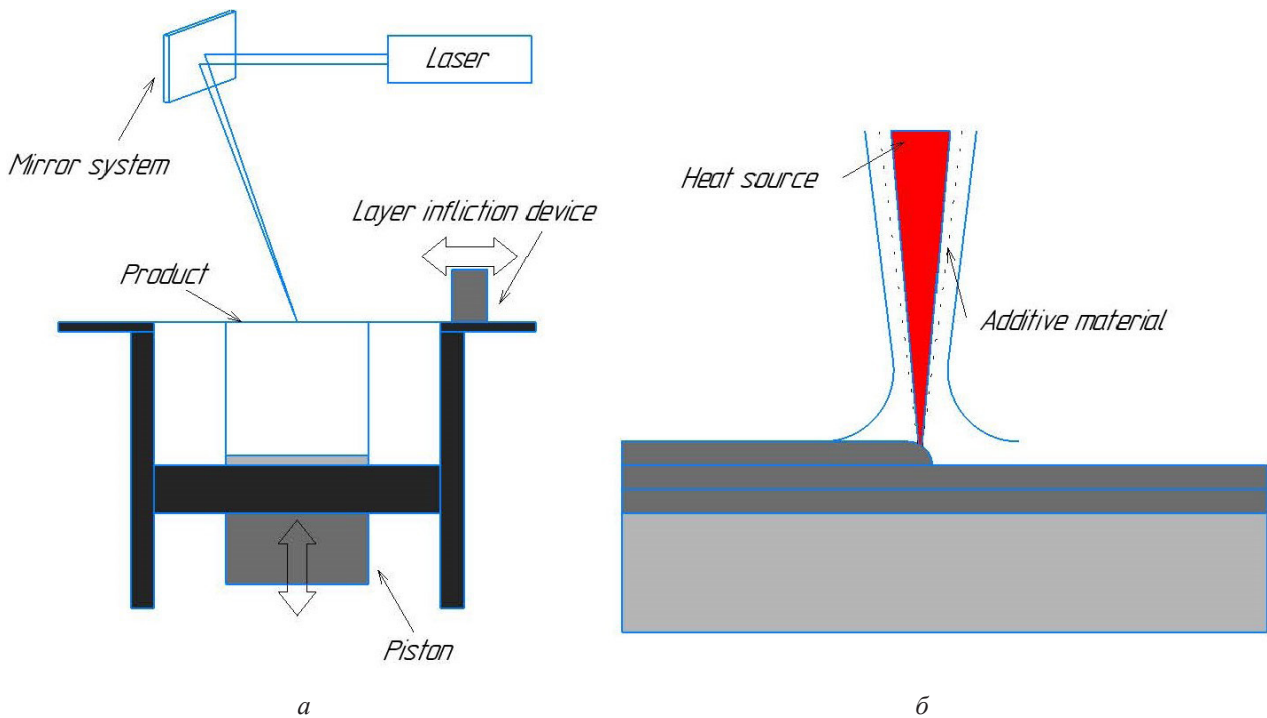


Рис. 2. Схемы аддитивных технологий:
a – PBF-process; б – DED-process

Fig. 2. Schemes of additive technologies:
a – PBF-process; б – DED-process

Технология прямого энергопереноса или DED-технология (рис. 2, б) работает по схожей схеме, но отличие заключается в том, что подача присадочного материала (порошка или проволоки) осуществляется непосредственно в зону расплавления.

Последовательность изготовления изделия данным методом следующая:

- напыляющая головка перемещается в точку начала напыления;
- подается материал в зону расплавления, отдаленную от головки;
- из головки исходит лазерное излучение, расплавляющее подложку, на которой происходит напыление, и присадку;

– после затвердевания ванны расплавленного металла образуется слой нанесенного металла.

DED-технологии могут использовать как материалы, применяемые при PBF, так и, например, металлические проволоки.

Сравнение PBF- и DED-технологий (табл. 1) по технологическим возможностям [7, 8] показывает, что DED-технология имеет несколько меньшую точность изготовления, более грубую шероховатость готовой детали, но в то же время позволяет достичь большей производительности, а также может использоваться в восстановлении поврежденных поверхностей любого пространственного положения.

Таблица 1. Сравнение PBF- и DED-технологий

Table 1. Comparison of PBF and DED technologies

Характеристика/процесс/ Characteristic/process	PBF	DED
Толщина слоя/ Layer thickness	20–100 мкм	500–100 мкм
Скорость построения/ Build speed	1–5 см ³ /ч	16–320 см ³ /ч
Качество получаемой поверхности/ The quality of the resulting surface	Ra = 5–12 мкм, Rz = 20–40 мкм	Ra = 20–50 мкм, Rz = 150–300 мкм, в зависимости от размера луча
Химический состав/ Chemical composition	Незначительное выгорание элементов/ Minor burnout of elements	
Возможности построения/ Building capabilities	Сложная геометрия с высоким разрешением/ Complex geometry with high resolution	Относительно простая геометрия с небольшим разрешением/ Relatively simple geometry with low resolution
Ремонт/восстановление/ Repair/restoration	Необходима горизонтальная поверхность/ A horizontal surface is required	Неограниченно/ Unlimited
Построение функционально- градиентных материалов/ onstruction of functionally gradient materials	Ограниченно/ Limited	Возможно/ Possible
Структура/ Structure	Мелкодисперсная структура, высокие механические свойства/ Fine structure, high mechanical properties	

Сравнение показывает, что для выращивания малогабаритных изделий, требующих высокой точности при изготовлении с минимальной обработкой после выращивания, технологии PBF-предпочтительнее. К таким деталям относятся полые и профилированные лопасти, форсунки и элементы топливной системы камеры сгорания, ячеистые структуры и другие детали, где точность изготовления внутренних полостей обуславливает перспективу применения технологий типа SLM [9, 10]. В то же время, для изготовления крупногабаритных узлов, например, корпусных узлов, где требуется высокая производительность, а последующая обработка неизбежна, технологии направленного выращивания более предпочтительны. Также у DED-технологий есть преимущество в виде отсутствия необходимости плоской подложки при выращивании, что позволяет использовать аддитивное выращивание методом DED для изготовления отдельных узлов (например, выращивание лопаток на диске моноколеса [11]) или ремонтного восстановления поврежденного узла [4].

Один из недостатков обеих разновидностей заключается в применении порошковых материалов. 3D-печать порошковыми материалами требует сложного и дорогостоящего

оборудования, которое производится небольшим количеством преимущественно зарубежных компаний [12]. С другой стороны, применение порошков также требует сложностей, связанных не только с разработкой материалов, но и с использованием узкого диапазона размеров гранул, зависящего, в том числе, и от имеющегося оборудования [7, 8, 13]. Данные особенности осложняют стремительный рост развития и внедрения аддитивных технологий на отечественных предприятиях, что сказывается и на темпах освоения теоретических аспектов аддитивных технологий [14, 15].

С другой стороны, возможным направлением развития аддитивных технологий являются методы выращивания с использованием металлической проволоки, к которым относится технология проволоочно-дугового выращивания или WAAM (Wire-Arc Additive Manufacturing, 3D metal printing etc.).

WAAM-технология (рис. 3) представляет процесс формирования слоев объемной детали методом послойного электродугового наваривания металлического проволоочного материала (1), на подложку детали (2). В «зоне наварки» (сварочной ванне 4) некоторое время осуществляется совместное плавление материала подложки и навариваемой проволоки.

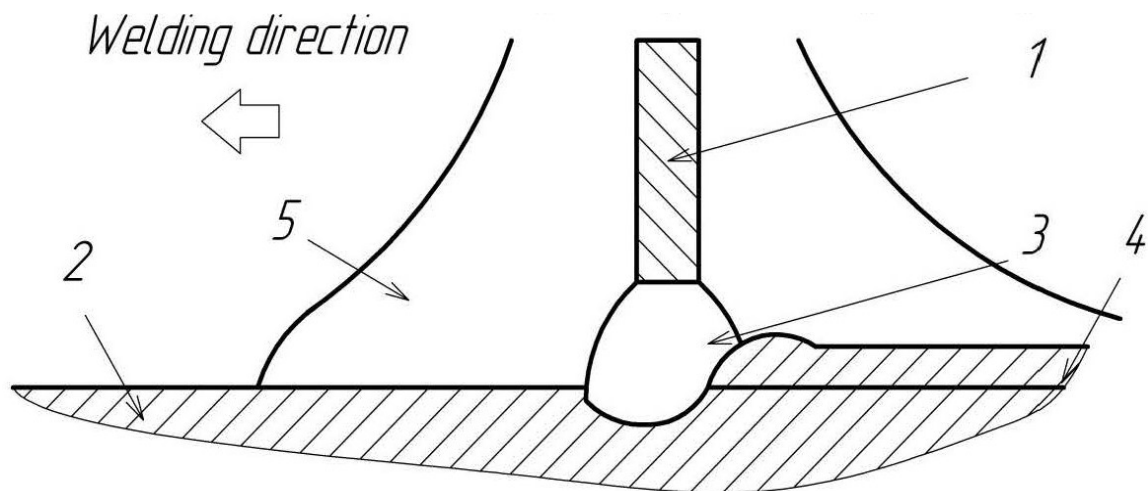


Рис. 3. Схема WAAM-процесса:

1 – подаваемая проволока; 2 – подложка; 3 – дуга; 4 – наваренный слой; 5 – газовая среда

Fig. 3. Schema WAAM-process:

1 – feed wire; 2 – substrate; 3 – arc; 4 – welded layer; 5 – gas medium

В зависимости от способа дуговой сварки, положенного в основу, рассматривать можно несколько разновидностей WAAM (рис. 4): плавящимся электродом в среде защитных газов (GMAW), неплавящимся вольфрамовым электродом в среде защитных

газов (GTAW), плазменной сваркой (PAW) и сваркой под флюсом (SAW). Из них наибольшее распространение получает применение GMAW-способа как более легко поддающемуся прогнозированию и автоматизации [16].

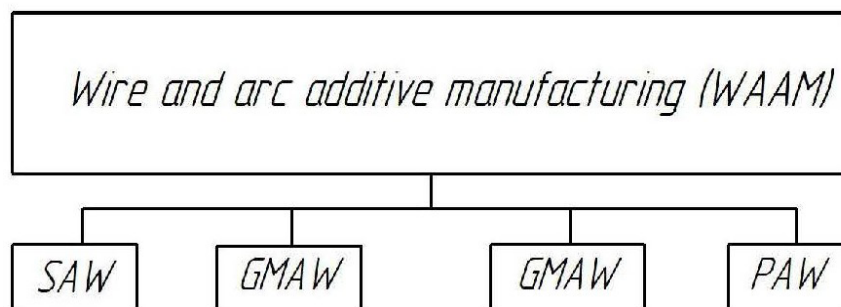


Рис. 4. Классификация WAAM-процессов

Fig. 4. Classification of WAAM processes

Технологии WAAM имеют ряд преимуществ перед другими технологиями, среди которых стоит отметить:

- высокую производительность наплавки;
- широкий диапазон размера наплавляемого слоя (1–10 мм);
- универсальность процесса: помимо выращивания новых деталей способ можно использовать и для ремонтных работ;
- доступность оборудования (сварочное оборудование дешевле и проще, чем, например, специфическое оборудование PBF-технологии или лазерной наплавки) и материалов (марок проволок на рынке огромное количество);
- изученность процесса: перечисленные способы сварки давно изучены и широко применяются для производства металлических изделий.

Есть у метода и недостатки, среди которых наиболее критичным можно считать тепловое воздействие на материал, что может приводить к деформациям выращиваемой конструкции [17]. Особенно данный недостаток следует учитывать в случае работы с жаропрочными никелевыми сплавами, чувствительность которых к термическому циклу обработки может быть причиной образования дефектов, в частности, горячих трещин [18].

Однако, для оценки величины этого теплового воздействия можно использовать такой критерий, как погонная энергия q_n , выражающийся в Дж/мм. Данный параметр можно оценить для порошковых технологий на примере прямого лазерного выращивания (DLD) и для WAAM на примере сварки плавящимся электродом (GMAW) для жаропрочных никелевых сплавов. В первом случае [19] погонная энергия, обеспечивающая бездефектное сплавление, может достигать 500–700 Дж/мм при производительности наплавки 0,75 г/с. В то же время в работе [20] для сварки сплава ЭП718 погонная энергия примерно равна 250–400 Дж/мм при производительности наплавки до 20 г/с. Исходя из этого можно предварительно оценить пер-

спективность WAAM-технологий как способа аддитивного выращивания узлов авиационных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов с тепловым воздействием на уровне имеющихся порошковых технологий.

Выводы

Для расширения применения аддитивных технологий в данной статье был проведен обзор наиболее распространенных современных видов этого производства. Было определено, что WAAM-технология имеет хорошие перспективы развития, в частности, в авиационном производстве, в особенности для выращивания деталей из жаропрочных никелевых сплавов в силу высокой производительности и большей доступности оборудования и материалов по сравнению с другими технологиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возможности аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии / А. В. Киричек [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. 2016. № 4 (52). С. 151–158. DOI: 10.12737/23204.
2. Babu S. S., Goodridge R. Additive manufacturing // Materials Science and Technology. 2015. V. 31, Iss. 8. P. 881–883. DOI: 10.1179/0267083615Z.000000000929.
3. Внедрение аддитивных технологий в литейном производстве авиационной компании «Прогресс» / А. С. Лунев [и др.] // Вестник Инженерной Школы ДВФУ. 2016. № 3(28). С. 99–105.
4. Методологические аспекты оценки целесообразности применения аддитивных технологий для изготовления запасных деталей машин / Н. К. Толочко [и др.] // АгораПанорама. Ресурсосбережение, экология. 2018. № 2 (126). С. 37–41.
5. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: selective laser sintering and inkjet 3D printing / Seyed Farid Seyed Shirazi et al. // Science and Technology of Advanced Materials. 2015. V. 16, Iss. 3. Article number 033502. DOI:10.1088/1468-6996/16/3/033502.
6. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting a review // International Materials Reviews. 2016. V. 61, Iss. 5. P. 361–377. DOI: 10.1080/09506608.2016.1176289.
7. Кондрашин А. А., Лямин А. Н., Слепцов В. В. Современные технологии изготовления трехмерных электронных устройств. М.: «ТЕХНОСФЕРА», 2019. 210 с.

8. Технологии, материалы и оборудование аддитивных производств. Часть 1 / Е. В. Преображенская [и др.]. М.: «МИРЭА – Российский технологический университет», 2021.
9. Prospects for the application of additive technologies for the creation of parts and assemblies of aviation gas turbine engines and ramjets engines / L. A. Magerramova, et al. // Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2019. V. 18, No. 3. P. 81–89.
10. Bhadeshia H. K. D. H. Additive manufacturing // Materials Science and Technology. 2016. V. 32, Iss. 7. P. 615–616. DOI: 10.1080/02670836.2016.1197523.
11. Markanday J. F. S. Applications of alloy design to cracking resistance of additively manufactured Ni-based alloys // Materials Science and Technology. 2022. P. 1–15. DOI: 10.1080/02670836.2022.2068759.
12. Баева Л. С., Маринин А. А. Современные технологии аддитивного изготовления объектов // Вестник МГТУ. Труды мурманского государственного технического университета. 2014. Т. 17, № 1. С. 7–12.
13. Materials and technologies for production products by additive manufacturing / A. N. Kubanova, et al. // Chebushevskii sbornik. 2019. V. 20, Iss. 3. P. 453–477.
14. Юрасёв Н. И. О возможностях развития аддитивных технологий в России // Современная экономика: проблемы и решения. 2015. № 9 (69). С. 72–79. DOI: 10.17308/meps.2015.9/1312.
15. Состояние теории и методологии управления внедрением аддитивных технологий в промышленности / В. А. Дресвянников [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2019. № 2 (50). С. 219–230. DOI 10.21685/2072-3016-2019-2-21.
16. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А. А. Осколков [и др.] // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2018. Т. 20, № 3. С. 90–104. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.11.
17. Wire and Arc Additive Manufacturing / S. W. Williams et al. // Materials Science and Technology. 2016. V. 32, Iss. 7. P. 641–647. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073.
18. Макаров Э. Л., Якушин Б. Ф. Теория свариваемости сталей и сплавов: монография / под ред. Макарова Э. Л. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 487 с.: ил.
19. Рашковец М. В., Никулина А. А., Ляпунова А. А. Получение жаропрочного никелевого сплава аддитивной технологией высокоскоростного прямого лазерного выращивания // Актуальные проблемы в машиностроении. 2018. Т. 5, № 3–4. С. 118–124.
20. Особенности формирования микроструктуры околошовной зоны при роботизированной сварке гетерогенного сплава на основе никеля / А. Ю. Медведев [и др.] // Materials. Technologies. Design. 2021. V. 1, No. 3. P. 40–47.