

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Электронно-лучевые аддитивные технологии (обзор литературных источников) / С.В. Варушкин, В.Я. Беленький, М.А. Ковтунович, Н.А. Колчанов, А.О. Печёнкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 79–88. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.4.08

Please cite this article in English as (Perm Polytech Style):

Varushkin S.V., Belenkiy V.Ya., Kovtunovich M.A., Kolchanov N.A., Pechenkin A.O. Electron beam additive technologies (review of literature sources). *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2024, vol. 26, no. 4, pp. 79-88. DOI: 10.15593/2224-9877/2024.4.08

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 26, № 4, 2024
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2024.4.08

УДК 539.3

**С.В. Варушкин¹, В.Я. Беленький^{1,2}, М.А. Ковтунович¹,
Н.А. Колчанов¹, А.О. Печёнкин¹**

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

²Пермский военный институт войск национальной гвардии
Российской Федерации, Пермь, Российская Федерация

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
(ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ)

Аддитивные технологии выращивания изделий интенсивно развиваются и все более широко начинают применяться в высокотехнологичных отраслях промышленности при изготовлении деталей сложной формы из конструкционных сталей и специальных сплавов. В настоящее время при изготовлении металлических изделий в большинстве случаев встречаются аддитивные технологии, основанные на использовании в качестве исходного материала порошковых материалов. Однако применение этих технологий существенно сужает перечень конструкционных материалов, из которых возможно получение изделий с необходимыми физико-механическими характеристиками. В то же время существенное повышение производительности процесса послойного выращивания изделий обеспечивают аддитивные технологии, основанные на наплавке проволоочного материала. Эти технологии позволяют значительно повысить коэффициент использования металла и сократить сроки технологической подготовки производства.

Приведен обзор литературных источников, описывающих разработку и исследование аддитивных процессов электронно-лучевого выращивания изделий с использованием проволоочного присадочного материала. Эти работы интенсивно проводятся в фирмах: 3D Systems Corporation (U.S.), 3T RPD (U.K.), Arcam AB (Sweden), Biomedical Model-ing, Inc. (U.S.), Envisiontec GmbH (Germany), EOS GmbH Electro Optical Systems (Germany), Fcubic AB (Sweden), GPI Prototype and Manufacturing Services, Inc. (U.S.), Greatbatch, Inc. (U.S.), Layerwise NV (Belgium), Limacorporate SPA (Italy), Materialise NV (Belgium), Medical Modeling, Inc. (U.S.) Norsk Titanium (U.S.), Sciaky (US). Рассмотрены характеристики материалов, выращенных электронно-лучевой проволоочной наплавкой. В качестве недостатков отмечено, что по сравнению с порошковыми способами наплавки, имеет место невысокая точность геометрии деталей, обусловленная температурными деформациями синтезируемого материала. Кроме того, поверхность изделий получается неровной в связи с послойным характером процесса наплавки, и для получения заданных геометрических параметров деталей необходимо проводить финишную механическую обработку их поверхности. Приведены параметры электронно-лучевой аддитивной наплавки, описано влияние режима подачи присадочной проволоки на результаты формирования изделий. Показаны математические модели процесса и проведен анализ патентов по электронно-лучевой наплавке проволоочным материалом.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, послойное формирование, электронно-лучевые источники тепловой энергии, наращивание изделий, режим подачи присадочной проволоки, модель аддитивного процесса, температурное поле, распределение мощности, анализ патентов.

**S.V. Varushkin¹, V.Ya. Belenkiy^{1,2}, M.A. Kovtunovich¹,
N.A. Kolchanov¹, A.O. Pechenkin¹**

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Perm Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation, Perm, Russian Federation

ELECTRON BEAM ADDITIVE TECHNOLOGIES (REVIEW OF LITERATURE SOURCES)

Additive technologies for growing products are developing intensively and are increasingly being used in high-tech industries for manufacturing complex-shaped parts from structural steels and special alloys. Currently, in most cases, additive technologies based on the use of powder materials as the source material are used in the manufacture of metal products. However, when using these technologies, the list of structural materials from which it is possible to obtain products with the required physical and mechanical characteristics is significantly narrowed. At the same time, a significant increase in the productivity of the layer-by-layer growth of products is provided by additive technologies based on surfacing of wire material. These technologies can significantly increase the metal utilization rate and reduce the time for technological preparation of production. The article provides a review of literary sources describing the development and study of additive processes for electron beam growth of products using wire filler material. These works are intensively carried out in the following companies: 3D Systems Corporation (U.S.), 3T RPD (U.K.), Arcam AB (Sweden), Biomedical Model-ing, Inc. (U.S.), Envisiontec GmbH (Germany), EOS GmbH Electro Optical Systems (Germany), Fcubic AB (Sweden), GPI Prototype and Manufacturing Services, Inc. (U.S.), Greatbatch, Inc. (U.S.), Layerwise NV (Belgium), Limacorporate SPA (Italy), Materialise NV (Belgium), Medical Modeling, Inc. (U.S.) Norsk Titanium (U.S.), Sciaky (US). The characteristics of materials grown by electron beam wire surfacing are considered. Among the disadvantages noted is the low accuracy of the geometry of parts, compared to powder surfacing methods, due to temperature deformations of the synthesized material. In addition, the surface of the products is uneven due to the layer-by-layer nature of the surfacing process, and to obtain the specified geometric parameters of the parts, it is necessary to carry out final mechanical processing of their surface. The parameters of electron-beam additive surfacing are given, the effect of the filler wire feed mode on the results of product formation is described. Mathematical models of the process are described and an analysis of patents on electron-beam surfacing with wire material is carried out.

Keywords: additive technologies, 3D printing, layered formation, electron beam sources of thermal energy.

Аддитивные технологии – одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства.

В настоящее время при изготовлении металлических изделий наиболее широко используются аддитивные технологии, основанные на использовании в качестве исходного материала порошковых композиций [1–4]. Однако при использовании аддитивных порошковых технологий в значительной степени сужается перечень конструкционных материалов, из которых возможно получение изделий с необходимыми физико-механическими характеристиками. Также производительность аддитивных порошковых технологий является крайне низкой, что приводит к низкой эффективности применения этих технологий при производстве крупногабаритных изделий.

Аддитивные технологии, основанные на наплавке проволоочного материала, обеспечивает существенное повышение производительности процесса послойного выращивания изделий [5–8]. При этом обеспечивается существенное повышение коэффициента использования металла, сокращение сроков технологической подготовки производства и обеспечивается возможность аддитивного выращивания металлических изделий с заданными физико-механическими характеристиками синтезируемого материала.

В данной статье приведен литературный обзор научных работ, посвященных разработке и исследованию аддитивных процессов электронно-лучевого выращивания изделий с использованием проволоочного присадочного материала.

Исследовательские работы в области аддитивных технологий с использованием проволоочных ма-

териалов интенсивно проводятся в фирмах: 3D Systems Corporation (U.S.), 3T RPD (U.K.), Arcam AB (Sweden), Biomedical Model-ing, Inc. (U.S.), Envisiontec GmbH (Germany), EOS GmbH Electro Optical Systems (Germany), Fcubic AB (Sweden), GPI Prototype and Manufacturing Services, Inc. (U.S.), Greatbatch, Inc. (U.S.), Layerwise NV (Belgium), Limacorporate SPA (Italy), Materialise NV (Belgium), Medical Modeling, Inc. (U.S.) Norsk Titanium (U.S.), Sciaky (US).

Одной из первых разработчиков технологий, использующих наплавку проволоочных материалов в вакууме, была компания Sciaky (США) [9; 10], которая специализировалась на разработке технологий и оборудования для электронно-лучевой сварки. В оборудовании для аддитивного производства компании Sciaky выращивание изделий из металла производится путем послойной наплавки проволоочного материала с использованием энергии электронного луча. Данная технология получила название EBDM – Electron beam Direct Manufacturing («прямое производство посредством электронного пучка») (рис. 1).

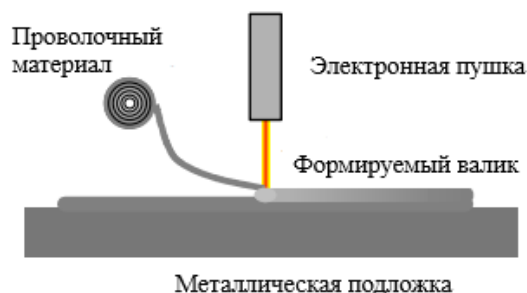


Рис. 1. Схема процесса электронно-лучевого выращивания изделий [16]



Рис. 2. Крупногабаритные детали, выращенные с использованием технологии электронно-лучевого выращивания [9]

Химический состав подложки, проволоки и напавленного металла из сплава «Инконель 718»

Параметр	Содержание элементов, %							
	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Ta	Ti	Al
По стандарту AMS 5596K	50–55	17–21	–	2,8–3,3	4,75–5,5	<0,05	0,65–1,15	0,2–0,8
Проволока	52,5	19,6	17,8	3,0	5,3	0	0,9	0,5
Подложка	53,7	18,2	17,9	2,9	5,2	0	1,0	0,5
Наплавка	54,0	18,1	17,5	3,2	5,3	0	1,0	0,5

Технология EBDM обладает высокой производительностью (3...9 кг/ч) и позволяет выращивать крупногабаритные детали, что достаточно сложно достигнуть при использовании других аддитивных технологий (рис. 2).

При выращивании деталей этим методом имеет место невысокое качество поверхности детали, однако сочетание данной технологии с последующей механической обработкой позволяет достичь существенной эффективности процесса. Присадочным материалом в данной технологии является проволока, что является важным преимуществом данной технологии, поскольку проволоки из никелевых сплавов, нержавеющей и инструментальных сталей и многие другие обладают значительно более низкой стоимостью, чем стоимость порошковых материалов [9; 11; 12].

Характеристики материалов, выращенных электронно-лучевой проволоочной наплавкой

Технология электронно-лучевого выращивания изделий с использованием проволоочного присадочного материала получила наиболее широкое распространение в аэрокосмической промышленности и других высокотехнологичных отраслях при производстве изделий из сплавов цветных металлов и высоколегированных конструкционных сталей, что обусловлено эффективной вакуумной защитой расплавленного металла от взаимодействия с газами окружающей среды.

В связи с тем, что в процессе электронно-лучевой наплавки происходит испарение элементов из ванны жидкого металла, в ряде случаев имеет место незначительное изменение химического состава синтезируемого сплава.

В ряде работ приведены данные по химическому составу различных материалов, полученных методом электронно-лучевого выращивания. В частности, для сплава «Инконель 718», широко применяемого при производстве авиационных двигателей, проведенные исследования показали, что при электронно-лучевом аддитивном процессе отсутствуют существенные изменения химического состава напавленного металла (таблица) [13]:

Интенсивное парообразование при электронно-лучевой наплавке в ряде случаев приводит к снижению качества синтезируемого материала, что связано с образованием газовых пор в закристаллизовавшемся металле, которые снижают эксплуатационные свойства получаемых изделий.

Исследование металла, синтезированного электронно-лучевой наплавкой проволоки из титанового сплава Ti-6Al-4V, выявило образование в металле пор необычного характера, связанных с испарением элементов [14]. При этом обыкновенные поры, вызванные испарением газов из расплава, имеют сферическую форму с гладкой поверхностью, а обнаруженные в синтезированном материале поры, которые авторы работы назвали порами с изрезанной поверхностью, также имеют форму сферы, но при этом их поверхность характеризуется большой шероховатостью и наличием неровностей.

При электронно-лучевой наплавке протекают сложные физические процессы теплопроводности и переноса массы, которые существенно влияют на микроструктуру полученного материала и могут приводить к образованию в металле трещин, пор и несплошностей. Высокие скорости охлаждения при электронно-лучевой наплавке способствуют полу-

чению мелкозернистой структуры металла и соответствующего улучшения механических свойств. Установлено, что с увеличением скорости наплавки размер дендритных зерен уменьшается из-за увеличения скорости охлаждения. Основными факторами, определяющими микроструктуру синтезированного сплава, является скорость наплавки и мощность нагрева, которые определяют скорость кристаллизации расплавленного металла. Чем выше скорость наплавки, тем выше скорость кристаллизации металла наплавленных валиков за счет отведения тепла в материал подложки. Корневая часть наплавленных валиков содержит дендритную микроструктуру, что свидетельствует о направленном теплоотводе из зоны, близкой к подложке. Верхняя часть валика состоит из мелких равноосных кристаллов, что обусловлено ухудшением условий теплоотвода от верхней части валика в подложку через уже нагретую корневую зону. Скорость отвода тепла в верхней части минимальна, что приводит к образованию равноосных зерен [15].

Одним из существенных недостатков проволоочной электронно-лучевой наплавки, по сравнению с порошковыми способами наплавки, является невысокая точность геометрии деталей, что связано с температурной деформацией синтезируемого материала. Также в процессе электронно-лучевого выращивания изделий их поверхность получается неровной в связи с послойным характером процесса наплавки [16] (рис. 3).

В соответствии с этим для получения заданных геометрических параметров деталей необходимо проводить финишную механическую обработку их поверхности.

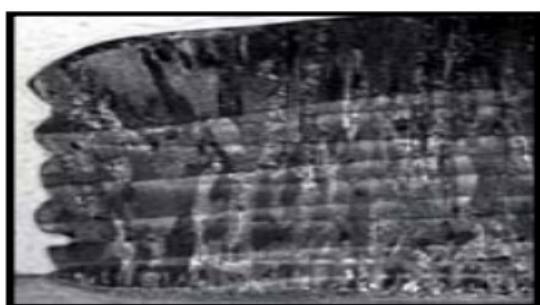


Рис. 3. Поверхность металла, формируемого при электронно-лучевом выращивании [16]

Параметры электронно-лучевой аддитивной наплавки и их влияние на результаты формирования изделий

Возможности использования электронно-лучевого аддитивного формирования сложных конструкций в значительной степени определяются используемыми технологическими приемами и параметрами режима наплавки. Режимы электрон-

но-лучевой наплавки определяют качество полученного материала, структуру и механические свойства, геометрические характеристики полученных изделий, а также производительность процесса аддитивного выращивания.

Для процесса электронно-лучевой сварки используется удельная мощность электронного луча до 10^7 Вт/см². Но в результате того, что для аддитивного выращивания не требуется проплавление основного металла, мощность электронного луча может быть значительно меньшей, но достаточной для оплавления присадочной проволоки, предыдущего валика или подложки, на которой выращивается изделие [17].

Параметрами процесса аддитивного электронно-лучевого выращивания изделий являются: ускоряющее напряжение, ток луча, скорость сварки, скорость подачи проволоки, положение фокуса электронного луча, параметры развертки луча (если она применяется). Эти параметры можно изменять в широком диапазоне, и их правильный выбор в большинстве случаев является сложной задачей [18].

Основной задачей при подборе режимов электронно-лучевой проволоочной наплавки является определение необходимой погонной энергии. Если ее значения высоки, то возникает кипение и разбрызгивание металла, приводящие к формированию неровной поверхности наплаваемого валика. При низких значениях погонной энергии имеет место переход к процессу стабильного формирования валика, при котором разбрызгивание не возникает и обеспечивается струйный перенос металла. В этом случае геометрия валика, а также структура синтезированного металла и его физико-механические свойства изменяются в течение процесса незначительно. Их изменения могут быть обусловлены только наличием каких-либо отклонений мощности, положения пучка, скорости подачи проволоки или перемещения изделия, а также влиянием зон повторного нагрева [18; 19].

Распределение удельной мощности электронного луча по пятну нагрева определяется не только положением фокуса электронного луча, но и параметрами развертки луча, которые определяют размеры зоны энергосвечения.

Диаметр электронного луча значительно меньше диаметра присадочной проволоки, который обычно составляет 0,8–4 мм. При этом минимальная ширина наплаваемых валиков может варьироваться в диапазоне 2,5–7 мм [20–22]. Это свидетельствует, что сфокусированный неподвижный электронный луч не обеспечит равномерного распределения температуры по поверхности проволоки и высокую степень равномерности распределения температуры по поверхности ванны рас-

плавленного металла, которая значительно превышает размеры электронного луча.

Для получения требуемого распределения мощности электронного луча необходимо либо использовать расфокусированный электронный луч, либо осуществлять развертку луча по какой-либо траектории. Однако практически установлено, что при изменении степени фокусировки электронного луча не удастся обеспечить постоянство распределения его удельной мощности. Поэтому в аддитивных электронно-лучевых технологиях применяют развертку сфокусированного электронного луча по заданной траектории в плоскости ванны расплавленного металла. При частотах развертки нескольких сотен герц и выше распределение температуры в пятне нагрева будет таким же, как и при воздействии неподвижного электронного пучка, распределенного равномерно вдоль всей траектории развертки.

Среди применяемых траекторий развертки электронного луча при электронно-лучевой наплавке часто используют спиральную траекторию перемещения электронного луча [23], которая получается при наложении круговой развертки с частотой несколько килогерц и поступательного перемещения электронного луча. Круговую осцилляцию электронного луча при электронно-лучевой наплавке использовали специалисты NASA при исследовании распределения температуры с помощью инфракрасных камер различного типа [24].

Влияние режима подачи присадочной проволоки

Важным параметром режима электронно-лучевой наплавки, кроме мощности электронного луча и размеров пятна нагрева, являются способ подачи присадочной проволоки и скорость подачи. Характеристики наплавленных валиков и, особенно, их геометрия существенно зависят от направления подачи присадочной проволоки. Скорость подачи проволоки определяет объем металла, который поступает при наплавке в жидкую ванну в единицу времени, и температура ванны. Также важным фактором, влияющим на процесс наплавки, является направление подачи проволоки, так как проволока за счет своего движения относительно ванны может оказывать механическое воздействие на поверхность расплавленного металла [19]. Кроме того, правильно выбранное направление ее подачи относительно направления наплавки позволяет минимизировать влияние неточности совмещения электронного пучка с проволокой или исключить влияние ее колебаний поперек направления подачи. На рис. 4 приведены основные способы подачи проволоки в жидкую ванну при электронно-лучевой наплавке.

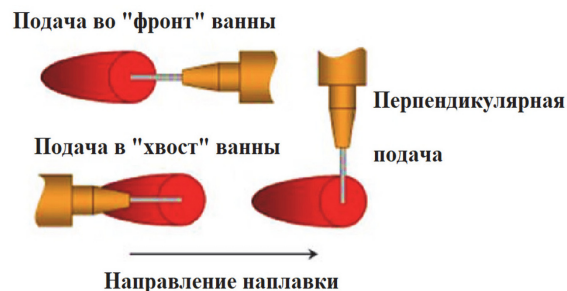


Рис. 4. Варианты ориентации проволоки относительно направления подачи [19]

Важную роль играет также правильный выбор угла подачи проволоки. В соответствии с результатами работ [25–27], величина этого угла составляет 30–35°.

Математические модели аддитивных процессов

Аддитивные процессы, использующие проволочную наплавку, имеют много общего со сваркой и родственными процессами. Как и в процессе сварки, движущийся источник тепла формирует сварочную ванну, которая перемещается вместе с тепловым источником. С технологической точки зрения аддитивные технологии, использующие оплавление присадочной проволоки, наиболее близки к многослойной наплавке, при которой также происходит взаимодействие присадочной проволоки с тепловым источником, постепенное наращивание наплавленных слоев, наложение термических циклов по мере добавления новых наплавленных слоев и присутствуют переходные изменения в геометрии. В большинстве случаев трудно определить распределение температурного поля в наплавленном изделии с использованием экспериментальных методик, так как термопары или тепловизоры позволяют оценить температуру только на поверхности металла. А распределение температур в самом изделии может быть определено только с использованием математического моделирования. Однако моделирование температур в трехмерной постановке является достаточно сложной и ресурсоемкой задачей из-за протекания при наплавке сложных физических процессов с различной скоростью, и многие из сделанных ранее расчетов связаны с существенными упрощениями, в частности, с использованием двухмерной постановки [28; 29]. Также распространенным упрощением является отсутствие учета конвективного теплообмена, в то время как он является основным механизмом теплообмена в расплаве. Такие упрощения в большинстве случаев приводят к значительным погрешностям в расчете температурных полей и скоростей охлаждения [30; 31]. Конвективные потоки обуславливают перемещение

жидкого металла и улучшение переноса тепла в расплаве. Их характер оказывает большое влияние на распределение температуры в жидком металле, процессы кристаллизации, в свою очередь определяющие микроструктуру и механические свойства синтезированного материала [32]. В связи с этим точные расчеты процессов наплавки требуют совместного решения уравнений теплопроводности и течения расплавленного металла. Иногда принимают значения плотности и других теплофизических характеристик материала в твердом и жидком состоянии постоянными, так как такое предположение позволяет значительно сэкономить вычислительное время. Поверхности наплавленных слоев в ряде случаев аппроксимируются различными простыми фигурами или вообще считаются плоскими. Это предположение незначительно влияет на температурные поля в металле и скорости охлаждения. Тепловые эффекты, связанные с испарением легирующих элементов, а это особенно важно при электронно-лучевой наплавке в вакууме, также игнорируются.

Для моделирования процессов тепломассопереноса при наплавке обычно используют систему уравнений: сохранения массы, импульса и энергии [30; 33–35].

Математическое моделирование процессов, протекающих при аддитивной наплавке, в большинстве случаев применяется для анализа процессов теплопередачи для получения информации о температуре в любых зонах выращиваемого изделия, особенно в тех, где определить температуру экспериментально невозможно [36; 37].

В работе [19] описана математическая модель, позволяющая определить размеры жидкой ванны, произвести расчет мощности, необходимой для плавления заданного объема металла, а также выполнить расчет размеров зон нагрева и скоростей нагрева и охлаждения. Модель позволяет рассчитать температуру в рассматриваемой зоне в текущий момент времени через значения температур, рассчитанных для предыдущего момента времени в этой зоне и окружающих ее участках металла. Вычисления температур в различных участках металла можно производить независимо друг от друга, что позволяет применять технологию параллельных вычислений.

В работе [19] также описана математическая модель теплопереноса, основанная на использовании уравнения энергии, которое решается относительно теплосодержания, а не температурного поля в металле, как при решении нестационарного уравнения теплопроводности. В этом случае необходимость ввода скрытых источников и стоков тепла отсутствует. Данная модель, основанная на использовании неявной разностной схемы и

уравнения энергии, в наибольшей степени обеспечивает устойчивость решения и позволяет решать задачу Стефана без применения «фиктивных» источников и стоков тепла. На основе этой модели, являющейся дескриптивной, может быть построена нормативная модель, которая позволяет определять мощность теплового источника, необходимую для поддержания требуемой температуры ванны, то есть реализовывать «виртуальную» обратную связь.

Анализ патентов по электронно-лучевой наплавке проволочным материалом

В качестве объекта анализа были выбраны способы электронно-лучевой наплавки проволочного материала с использованием одной или нескольких электронно-лучевых пушек, осцилляцией электронного луча и контролем положения присадочной проволоки по параметрам вторичного излучения из зоны наплавки.

Поиск был проведен по классификационным рубрикам международной патентной классификации:

B33Y30/00 – устройства для послойного синтеза; конструктивные элементы или аксессуары для них.

B33Y10/00 – процессы технологии послойного синтеза.

B33Y50/02 – процессы технологии послойного синтеза для управления или регулирования процессов послойного синтеза.

Y02P10/295 – additive manufacturing of metals.

В результате поиска были обнаружены следующие патенты:

- Патент КНР на изобретение CN106984894, когда при наплавке каждого участка производится подача той проволоки, которая имеет требуемое расположение относительно направления наплавки. Таким образом достигается снижение влияния расположения присадочной проволоки относительно направления наплавки на качество наплаваемого слоя.

- Международная заявка WO2012082091, в которой осуществляют генерацию электронного луча со сложным растровым рисунком. При этом обеспечивает контроль над местоположением, мощностью, временем задержки электронного луча для генерации сложного растрового рисунка. При этом после нагрева поверхности подложки до образования ванны жидкого металла часть энергии электронного луча или весь луч может быть отклонен и перенаправлен на предварительный нагрев осаждаемой проволоки, что предотвращает смещение осаждаемого материала.

- Заявка США на изобретение US2016016254, в которой описан растровый способ электронно-

лучевого послойного синтеза с осцилляцией электронного луча по замкнутой траектории, включающий мониторинг в реальном времени состояния зоны подачи и наплавки проволоки на подложку с помощью соответствующих датчиков и регулирование процесса в зависимости от отклонения выбранных параметров наплавки.

- Патент США на изобретение US8809780, в котором в процессе электронно-лучевого послойного синтеза, включающего контроль положения присадочной проволоки относительно электронного луча посредством наблюдения отраженных электронов, электронный луч периодически осциллирует по расстановочной траектории с частотой не менее 5 раз в секунду для сканирования зоны наплавки.

- Патент США на изобретение US4348576, в котором регулируют положения электронного луча по отношению к присадочной проволоке или зазору между свариваемыми кромками посредством периодического измерения сигнала от датчиков рентгеновского излучения, при этом луч осциллирует по замкнутой треугольной траектории.

- Патент КНР на изобретение CN106392290, в котором электронно-лучевую наплавку производят симметрично расположенными несколькими электронно-лучевыми пушками вокруг канала для подачи проволоки.

- Патент США на изобретение US2017/0304896, в котором используют специализированную электронно-лучевую пушку с каналом для подачи присадочной проволоки, а для формирования электронного луча применяют кольцевой катод с центральным отверстием, через которое происходит подача присадочной проволоки. При этом получаемый электронный луч имеет форму полого конуса с вершиной в зоне формирования расплавленной ванны металла.

- Патент РФ на изобретение № 2510744, в котором используют видеокамеры и системы подсветки для наблюдения и контроля процесса электронно-лучевой наплавки, в том числе при аддитивном производстве. При этом видеонаблюдение позволяет динамически контролировать положение проволоки относительно электронного луча.

Заключение

Проведенный литературный обзор показывает, что на текущий момент имеется обширный ряд публикаций в части реализации аддитивных технологий с использованием электронно-лучевой наплавки проволоочного материала. В то же время многие процессы электронно-лучевого оплавления проволоочного материала при аддитивных технологиях формирования изделий из различных металлических конструкционных материалов изучены недостаточно полно, в частности, отсутствуют ре-

зультаты исследований процесса с вертикальной подачей присадочной проволоки, что требует дальнейшего изучения этих процессов, разработки новых математических моделей и проведения экспериментальных исследований для создания электронно-лучевого оборудования и разработки высокоэффективных аддитивных технологий.

Библиографический список

1. Elliott, J.A. Novel Approaches to Multiscale Modelling in Materials Science / J.A. Elliott // *International Materials Reviews*. – 2011. – Vol. 56. – P. 207–225.
2. Petrick, I. 3D Printing Disrupts Manufacturing / I. Petrick, T. Simpson // *Research-Technology Management*. – 2013. – November-December. – P. 15–16.
3. Environmental Aspects of Laser-Based and Conventional Tool and Die Manufacturing / W.R. Morrow, H. Qi, I. Kim, J. Mazumder, S.J. Skerlos // *J. Clean Prod.* – 2007. – Vol. 15. – P. 932–943.
4. Wray, P. Additive Manufacturing: Turning Manufacturing Inside Out / P. Wray // *Amer. Ceram. Soc. Bull.* – 2014. – Vol. 93 (3). – P. 17–23.
5. Jhavar, S. Development of micro-plasma transferred arc (μ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications / S. Jhavar, N.K. Jain, C.P. Paul // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – Vol. 214, no. 5. – P. 1102–1110.
6. Freedman, D.H. Layer by Layer / D.H. Freedman // *MIT Tech. Rev.* – 2012. – Vol. 115(1). – P. 50–53.
7. Direct metal part forming of 316L stainless steel powder by electron beam selective melting / H.B. Qi [et al.] // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2006. – Vol. 220, no. 11. – P. 1845–1853.
8. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies / L.E. Murr [et al.] // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2012. – Vol. 28, no. 1. – P. 1–14.
9. Sciaky Inc. Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) – Advantages of Wire AM vs. Powder AM [Электронный ресурс]. – URL: <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebamad-advantages-of-wire-am-vs-powder-am> (дата обращения: 31.01.2024).
10. Sciaky Inc, Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.sciaky.com/images/pdfs/product-sheets/Sciaky-EBAM-Technology.pdf> (дата обращения: 31.01.2024).
11. Frazier, W.E. Metal additive manufacturing: a review / W.E. Frazier // *J Mater Eng Perform*. – 2014. – Vol. 23(6). – P. 1917–1928.
12. Tapia, G. A review on process monitoring and control in metal-based additive manufacturing / G. Tapia, A. Elwany // *J Manuf Sci Eng.* – 2014. – Vol. 136(6). – P. 060801.
13. Keith Bird, R. Effect of Orientation on Tensile Properties of Inconel 718 Block Fabricated with Electron Beam Freeform Fabrication (EBF3) / R. Keith Bird, S. Todd Atherton. – NASA Langley Research Center, Hampton, VA, United States. July, 2010.

14. Evaporation Ripped Metallurgical Pore in Electron Beam Freeform Fabrication of Ti-6Al-4V / Tao Chen, Shengyong Pang, Qun Tang, Hongbo Suo, Shuili Gong // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2016. – Vol. 31(15). – P. 1995–2000.
15. Wang, L. Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Deposits of AISI 316L Stainless steel / L. Wang. // *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2011*. November 11–17, 2011. – Denver, Colorado, USA, 2011.
16. Taminger, Karen M. Electron beam freeform fabrication technology development for aerospace applications / Karen M. Taminger // *Airbus Materials & Structures Work-shop*. April 6–7. – 2006.
17. Зуев, И.В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии / И.В. Зуев; Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ). – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – 162 с.
18. Fuchs, J. Wire-based Additive manufacturing using an electron beam as heat source / J. Fuchs, C. Schneider, N.ENZINGER // *Welding in the World*. – 2018. – Vol. 62. – P. 267–275.
19. Электронно-лучевая технология аддитивного формообразования с подачей присадочной проволоки: монография / А.В. Щербаков, Д.А. Гапонова, А.П. Слива [и др.] // Из-во НИУ «МЭИ». – М., 2020. – 195 с.
20. Особенности формирования изделий методом электронно-лучевой наплавки / А.В. Гуденко, А.П. Слива, В.К. Драгунов, А.В. Щербаков // *Сварочное производство*. – 2018. – № 8. – С. 12–19.
21. Pixner, F. Wire based Additive Manufacturing of tool components: PhD thesis / F. Pixner. – TU Graz, ongoing (COMET K2 IC-MPPE Project P3.10 AM Tool).
22. An experimental study of current-density distributions of a technological electron beam / A.V. Shcherbakov, R.V. Rodyakina, A.S. Kozhechenko, D.A. Gaponova, A.L. Goncharov, V.K. Dragunov // *Technical Physics Letters*. – 2017. – Vol. 43. – P. 958–960.
23. Ramesh Davé, Vivek Electron Beam (EB) – Assisted Materials Fabrication: Ph.D. Thesis / Vivek Ramesh Davé // *Materials Engineering at the Massachusetts Institute of Technology*, 1995.
24. In-process thermal imaging of the electron beam freeform fabrication process / Karen M. Taminger, Christopher S. Domack, Joseph N. Zalameda, Brian L. Taminger, Robert A. Hafley, Eric R. Burke // *Proceedings*. – 2016. – Vol. 9861. Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVIII. – P. 986102. DOI: 10.1117/12.2222439
25. Fuchs, J. Wire-based Additive manufacturing using an electron beam as heat source / J. Fuchs, C. Schneider, N.ENZINGER // *Welding in the World*. – 2018. – Vol. 62. – P. 267–275.
26. Electron beam additive manufacturing with wire / Marek St. Węglowski, Sylwester Błacha, Robert Jachym, Jan Dutkiewicz, Łukasz Rogal // «E+E». – 2018. – Vol. 53, iss. 3–4. – P. 74–78.
27. Leithäuser, T. Influence of the Wire Feeding on the Wetting Process during Laser Brazing of Aluminum Alloys with Aluminum-Based Braze Material / T. Leithäuser, P. Woizeschke // *J. Manuf. Mater. Process*. – 2019. – Vol. 3. – P. 83. DOI: 10.3390/jmmp3040083
28. Deformation modelling in layered manufacturing of metallic parts using gas metal arc welding: effect of process parameters / M.P. Mughal, H. Fawad, R.A. Mufti, M. Siddiqui // *Model Simul Mater Sc.* – 2005. – Vol. 13(7). – P. 1187–1204.
29. Vasinonta, A. Process maps for predicting residual stress and melt pool size in the laser-based fabrication of thin-walled structures / A. Vasinonta, J.L. Beuth, M. Griffith // *J Manuf Sci Eng.* – 2007. – Vol. 129(1). – P. 101–109.
30. Manvatkar, V. Heat transfer and material flow during laser assisted multi-layer additive manufacturing / V. Manvatkar, A. De, T. DebRoy // *J Appl Phys.* – 2014. – Vol. 116(12). – Article No. 124905.
31. Svensson, L.E. An analysis of cooling curves from the fusion zone of steel weld deposits / L.E. Svensson, B. Grefott, HKDH. Bhadeshia // *Scand J Metall.* – 1986. – Vol. 15(2). – P. 97–103.
32. Mark, M. Multiscale modeling of powder bed-based additive manufacturing / M. Mark, C. Körner // *Ann Rev Mater Res.* – 2016. – Vol. 46. – P. 93–123.
33. Manvatkar, V. Spatial variation of melt pool geometry, peak temperature and solidification parameters during laser assisted additive manufacturing process / V. Manvatkar, A. De, T. DebRoy // *Mater Sci Tech.* – 2015. – Vol. 31(8). – P. 924–930.
34. Heat transfer and fluid flow in additive manufacturing / A. Raghavan, H.L. Wei, T.A. Palmer, T. DebRoy // *J Laser Appl.* – 2013. – Vol. 25(5). – Article No. 052006.
35. Patankar, S. Numerical heat transfer and fluid flow / S. Patankar // *CRC Press*. – 1980.
36. Gockel, J. Integrated control of solidification microstructure and melt pool dimensions in electron beam wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V / J. Gockel, J. Beuth, K. Taminger // *Additive manufacturing*. – 2014. – Vol. 1–4. – P. 119–126.
37. Numerical 3D simulation of wire deposition process to predict distortion of parts / O.Y. Smetannikov, P.V. Maksimov, D.N. Trushnikov [et al.] // *Mech Adv Mater Mod Process*. – 2019. – Vol. 5(3).

References

1. Elliott J.A. Novel Approaches to Multiscale Modelling in Materials Science. *International Materials Reviews*. 2011, 56, p. 207–225.
2. Petrick I., Simpson T. 3D Printing Disrupts Manufacturing. *Research-Technology Management*, November–December 2013, p.15–16.
3. Morrow W.R., Qi H., Kim I., Mazumder J., Skerlos S.J. Environmental Aspects of Laser-Based and Conventional Tool and Die Manufacturing. *Journal Clean Prod.*, 2007, 15, p. 932–943.
4. Wray P. Additive Manufacturing: Turning Manufacturing Inside Out. *Amer. Ceram. Soc. Bull.*, 2014, 93, 3, p. 17–23.
5. Jhavar S., Jain N.K., Paul C.P. Development of micro-plasma transferred arc (μ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, no. 5, pp. 1102–1110.
6. Freedman D.H. Layer by Layer, *MIT Technology Review*, 2012, iss. 115, no. 1, p. 50–53.
7. Qi H.B. et al. Direct metal part forming of 316L stainless steel powder by electron beam selective melting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*.

Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, 2006, vol. 220, no. 11, pp. 1845–1853.

8. Murr L.E. et al. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science and Technology*, 2012, vol. 28, no. 1, pp. 1–14.

9. Sciaky Inc. Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) - Advantages of Wire AM vs. Powder AM. URL: <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebamadvantages-of-wire-am-vs-powder-am>.

10. Sciaky Inc. Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM). URL: <http://www.sciaky.com/images/pdfs/product-sheets/Sciaky-EBAM-Technology.pdf>

11. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal Materials Engineering Perform*, 2014, iss. 23(6):1917, p. 28.

12. Tapia G., Elwany A.A review on process monitoring and control in metal-based additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, iss. 136(6):060801.

13. R. Keith Bird, Todd S. Atherton. Effect of Orientation on Tensile Properties of Inconel 718 Block Fabricated with Electron Beam Freeform Fabrication (EBF3). *NASA Langley Research Center; Hampton, VA, United States. July*, 2010.

14. Tao Chen, Shengyong Pang, Qun Tang, Hongbo Suo, Shuili Gong (2016) Evaporation Ripped Metallurgical Pore in Electron Beam Freeform Fabrication of Ti-6Al-4V. *Materials and Manufacturing Processes*, 2016, iss. 31:15, pp. 1995–2000.

15. Wang L. Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Deposits of AISI 316L Stainless steel. *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. IMECE2011*, 2011, Denver, Colorado, USA.

16. Karen M. Taminger. Electron beam freeform fabrication technology development for aerospace applications. *Airbus Materials and Structures Workshop*. April 6–7, 2006.

17. Zuev I.V., Processing of materials with concentrated energy flows Moscow. Energy Institute (MEI TU). Moscow: Publishing House of MEI, 1998, 162 p.

18. Fuchs J., Schneider C., Enzinger N. Wire-based Additive manufacturing using an electron beam as heat source. *Welding in the World*, 2018, iss. 62, pp. 267–275.

19. Shcherbakov A.V., Gaponova D.A., Sliva A.P. et al. Electron beam technology of additive shaping with the supply of filler wire [Electron-beam technology of additive molding with filler wire feeding: monograph]. Monograph. Moscow, 2020, 195 p.

20. Gudenko A.V., Sliva A.P., Dragunov V.K., Shcherbakov A.V. Features of the formation of products by electron beam surfacing // *Welding production*, 2018, No. 8, pp. 12–19.

21. F. Pixner, PhD thesis «Wire based Additive Manufacturing of tool components». TU Graz, ongoing (COMET K2 IC-MPPE Project P3.10 AM Tool).

22. Shcherbakov A.V., Rodyakina R.V., Kozhenchenko A.S., Gaponova D.A., Goncharov A.L., Dragunov V.K. An experimental study of current density distributions of a technological electron beam [Peculiarities of forming products by electron-beam cladding method]. *Technical Physics Letters*, 2017, vol. 43, pp. 958–960.

23. Vivek Ramesh Davé. Electron Beam (EB) - Assisted Materials Fabrication. Ph.D. Thesis, 1995.

24. Karen M. Taminger, Christopher S. Domack, Joseph N. Zalameda, Brian L. Taminger, Robert A. Hafley, Eric R. Burke. Inprocess thermal imaging of the electron beam freeform fabrication process. *Proceedings. Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXVIII; 986102*, 2016, vol. 986. <https://doi.org/10.1117/12.2222439>.

25. Fuchs J., Schneider C., Enzinger N. Wire-based Additive manufacturing using an electron beam as heat source. *Welding in the World*, 2018, iss. 62, pp. 267–275.

26. Marek St. Węglowski, Sylwester Błacha, Robert Jachym, Jan Dutkiewicz, Łukasz Rogal. Electron beam additive manufacturing with wire. «E+E», 2018, vol. 53, iss. 3–4, pp. 74–78.

27. Leithäuser T., Woizeschke P. Influence of the Wire Feeding on the Wetting Process during Laser Brazing of Aluminum Alloys with Aluminum-Based Braze Material. *Journal Manuf. Mater. Process*, 2019, iss. 3, no. 83. Doi:10.3390/jmmp3040083.

28. Mughal M.P., Fawad H., Mufti R.A., Siddique M. Deformation modelling in layered manufacturing of metallic parts using gas metal arc welding: effect of process parameters. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2005, iss. 13(7), pp. 1187–204.

29. Vasinonta A., Beuth J.L., Griffith M. Process maps for predicting residual stress and melt pool size in the laser-based fabrication of thin-walled structures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2007, iss. 129(1): 101–9.

30. Manvatkar V., De A., DebRoy T. Heat transfer and material flow during laser assisted multi-layer additive manufacturing. *Journal of Applied Physics*, 2014, iss. 116(12), no. 124905.

31. Svensson L.E., Grefott B., Bhadeshia H.K.D.H. An analysis of cooling curves from the fusion zone of steel weld deposits. *Scand. Journal Metall*, 1986, iss. 15(2), pp. 97–103.

32. Mark I.M., Korner C. Multiscale modeling of powder bed-based additive manufacturing. *Annual Review of Materials Research*, 2016, iss. 46, pp. 93–123.

33. Manvatkar V., De A., DebRoy T. Spatial variation of melt pool geometry, peak temperature and solidification parameters during laser assisted additive manufacturing process. *Materials Science and Technology*, 2015, iss. 31(8), pp. 924–30.

34. Raghavan A., Wei H.L., Palmer T.A., DebRoy T. Heat transfer and fluid flow in additive manufacturing. *Journal of Laser Applications*, 2013, iss. 25(5), no. 052006.

35. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow. CRC Press, 1980.

36. Gockel J., Beuth J., Taminger K. Integrated control of solidification microstructure and melt pool dimensions in electron beam wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V. *Additive manufacturing*, 2014, vol. 1–4, pp. 119–126.

37. Smetannikov O.Y., Maksimov P.V., Trushnikov D.N. et al. Numerical 3D simulation of wire deposition process to predict distortion of parts. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 2019, no. 5, p. 3 (2019).

Поступила: 04.10.2024

Одобрена: 15.11.2024

Принята к публикации: 19.11.2024

Об авторах

Варушкин Степан Владимирович (Пермь, Российская Федерация) – кандидат технических наук, научный сотрудник Лаборатории методов создания и проектирования систем «Материал – Технология – Конструкция» (Российская Федерация, 614023, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: stepan.varushkin@mail.ru).

Беленький Владимир Яковлевич (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов», профессор кафедры эксплуатации автобронетанковой техники Пермского военного института войск национальной гвардии Российской Федерации (Российская Федерация, 614030, г. Пермь, ул. Гремячий лог, 1, e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru).

Ковтунович Максим Алексеевич (Пермь, Российская Федерация) – бакалавр, магистрант, инженер-технолог (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: 469safari33@mail.ru).

Колчанов Николай Андреевич (Пермь, Российская Федерация) – бакалавр, магистрант, инженер-технолог (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: nikolayiriv@yandex.ru).

Печёнкин Александр Олегович (Пермь, Российская Федерация) – бакалавр, магистрант, инженер-технолог (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: aleks.pe4enkin@yandex.ru).

About the authors

Stepan V. Varushkin (Perm, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Laboratory of Methods of Creation and Design of systems "Material –

Technology – Construction" (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: stepan.varushkin@mail.ru).

Vladimir Y. Belenky (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Welding Production, Metrology and Technology of Materials", Professor of the Department of Operation of Armored Vehicles, Perm Military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation (1, st. Rattling log, Perm, 614030, Russian Federation, e-mail: vladimirbelenkij@yandex.ru).

Maxim A. Kovtunovich (Perm, Russian Federation) – Bachelor's degree, Master's degree, Process Engineer (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: 469safari33@mail.ru).

Nikolai A. Kolchanov (Perm, Russian Federation) – Bachelor's degree, Master's degree, process engineer (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: e-mail: nikolayiriv@yandex.ru).

Alexandr O. Pechenkin (Perm, Russian Federation) – Bachelor's degree, Master's degree, Process Engineer (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: aleks.pe4enkin@yandex.ru).

Финансирование. Работа не имела финансовой поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.