

Научная статья

УДК 621.791

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-31-45

АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПРОВОЛОКИ

А.В. Свиридов¹, О.В. Фомичева¹, Е.В. Голев¹, О.Е. Козырева¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлен обзор основных этапов разработки технологии электродуговой наплавки проволоки (*Wire Ark Additive Manufacturing – WAAM*). Приведен опыт применения технологии WAAM для различных групп материалов – сталей, никелевых, титановых, алюминиевых и других сплавов. Рассмотрены основные проблемные вопросы и методы улучшения качества заготовок, полученных по технологии WAAM. Преимущества технологии – низкая трудоемкость, высокие коэффициент использования материала и производительность; возможность синтеза и восстановления крупногабаритных деталей; менее наукоемкое изготовление проволоки в сравнении с металлическими порошками.

Ключевые слова: аддитивное производство, электродуговая наплавка (WAAM), дуговая сварка плавящимся электродом (GMAW), плазменно-дуговая сварка (PAW), холодный перенос металла (CMT), лазерная наплавка (LMD), аддитивная электронно-лучевая технология сварки (EBAM)

Для цитирования: Свиридов А.В., Фомичева О.В., Голев Е.В., Козырева О.Е. Аддитивное производство методом электродуговой наплавки проволоки // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-31-45.

Scientific article

WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

A. V. Sviridov¹, O. V. Fomicheva¹, E. V. Golev¹, O. E. Kozyreva¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article presents the main stages of development of wire arc cladding (WAAM) technology. The experience of using WAAM for various groups of materials (steel, nickel, titanium, aluminum and other alloys) is presented. The main problematic issues and methods for improving quality of workpieces obtained by WAAM technology are considered. Advantages of the technology are low labor intensity, high material utilization factor and productivity; the ability to synthesize and restore large-sized parts; less science-intensive production of wire compared to metal powders.

Keywords: additive manufacturing, wire arc additive manufacturing (WAAM), gas metal arc welding (GMAW), plasma arc welding (PAW), cold metal transfer (CMT), laser metal deposition (LMD), electron beam additive manufacturing (EBAM)

For citation: Sviridov A.V., Fomicheva O.V., Golev E.V., Kozyreva O.E. Wire arc additive manufacturing method. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-31-45.

Введение

В данной статье рассмотрены основные способы производства изделий с использованием технологии электродуговой наплавки проволокой (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM), а также опыт применения различных способов данного метода, приведены исследования российских и зарубежных специалистов, основные проблемы данного метода и пути их решения.

В настоящее время применение аддитивных технологий является одним из наиболее актуальных трендов в мировой инженерной индустрии. Благодаря использованию цифровой модели и послойному нанесению материала такие технологии позволяют изготавливать изделия сложной геометрической формы с меньшей трудоемкостью, чем при традиционных способах. Примеры таких изделий, выполненных методом WAAM, приведены на рис. 1. В сравнении с литьем и обработкой давлением способы аддитивного производства обладают более высоким коэффициентом использования материала. Изделия, изготовленные с использованием аддитивных технологий, находят применение во многих отраслях промышленности – аэрокосмической, автомобильной, медицинской и других [1–6].



Рис. 1. Изделия, полученные методом электродуговой наплавки (WAAM)

Процессы прямого подвода энергии и материала различаются в зависимости от типа сырья (металлопорошковая композиция, проволока), источника энергии (лазерный луч, электронный луч, электрическая дуга, плазма), количества источников энергии и конструкции установки (роботизированная или порталная конструкция). На рис. 2 представлена порталная установка для осуществления электродуговой наплавки [7].



Рис. 2. Портальная установка для осуществления электродуговой наплавки (WAAM)

Исходный материал подается непосредственно в ванну расплава, образованную источником тепловой энергии, в результате чего происходит послойное плавление материала в среде защитного газа либо в вакууме [8].

Технология WAAM предполагает наплавление исходного материала в виде проволоки с использованием энергии электрической дуги.

Для производства крупногабаритных металлических заготовок средней сложности технология WAAM является наиболее рентабельной. Однако основными недостатками этого процесса являются низкая точность и качество поверхности, поэтому требуются последующая обработка на станках с числовым программным управлением [9, 10].

Материалы, методы и основные результаты ***Разновидности способов технологии WAAM***

В зависимости от технологии сварки, лежащей в основе процесса WAAM, существуют три его разновидности: дуговая сварка плавящимся электродом (Gas Metal Arc Welding – GMAW) [11, 12], дуговая сварка неплавящимся электродом (Gas Tungsten Arc Welding – GTAW) [13, 14] и плазменно-дуговая сварка (Plasma Arc Welding – PAW) [15].

В процессе GMAW электрическая дуга возникает между плавящимся электродом (присадочной проволокой) и заготовкой. Режим передачи металла имеет важное значение в процессе WAAM на основе способа GMAW, поскольку оказывает прямое влияние на качество поверхности, микроструктуру и механические свойства материала. На рис. 3 и 4 показаны соответственно присадочная проволока и рабочая камера портальной установки, используемой для осуществления данного процесса.



Рис. 3. Присадочная проволока для электродуговой наплавки (WAAM)

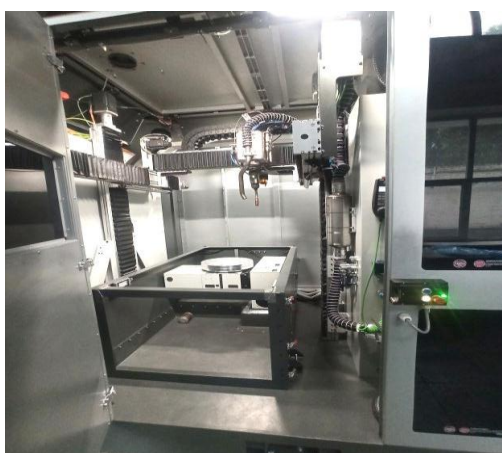


Рис. 4. Рабочая камера портальной установки для осуществления электродуговой наплавки (WAAM)

Процесс GMAW–WAAM с использованием холодного переноса металла (Cold Metal Transfer – CMT) доказал свою эффективность в контролируемом режиме передачи металла и обеспечивает хороший контроль геометрических размеров и микроструктуры изделий. В процессе GMAW электрод защищен инертным газом [16, 17].

Исследование в работе [18] показало, что в ряде случаев процесс WAAM на основе способа GMAW обладает более высокими характеристиками (скоростью наплавки, коэффициентом использования материала, производительностью и экологической безопасностью) по сравнению с аддитивными технологиями на основе электронно-лучевой наплавки (EBAM), лазерной наплавки (LMD), наплавки с использованием вольфрамового электрода (GTAW) и плазменно-дуговой наплавки (PAW).

Во время процесса GTAW электрическая дуга горит между неплавящимся вольфрамовым электродом и заготовкой. Присадочная проволока подается в расплавленную ванну, созданную электрической дугой, через отдельный механизм подачи проволоки, что приводит к ее плавлению и осаждению на заготовке [19]. Скорость осаждения в процессе на основе GTAW самая низкая по сравнению с процессами WAAM на основе GMAW и PAW.

В процессе PAW дуга зажигается между вольфрамовым электродом и водоохлаждаемым соплом. Инертный газ (в основном аргон) ионизируется под воздействием электрической дуги и создает плазменную струю. Эта плазменная струя фокусируется на пластину заготовки через узкое отверстие сопла, что приводит к созданию расплавленной ванны над заготовкой. Исходная проволока подается в эту ванну, плавится и осаждается на поверхности заготовки [20]. Производительность наплавки в процессе PAW выше, чем при способе GTAW, но ниже, чем при способе GMAW.

Плазменно-дуговая наплавка (PAW) обладает наивысшей энергетической плотностью, что обеспечивает более высокую скорость перемещения электрода и меньшую деформацию сварных швов [21]. Однако, несмотря на высокое качество наплавки, процесс PAW является наиболее затратным среди процессов WAAM.

Рассмотрим основные этапы процесса WAAM. Основные критерии выбора процесса включают параметры моделирования в CAD-среде, создание траектории инструмента в процессе сварки, параметры сварочного процесса, выбор защитного газа и проволоки.

Параметры CAD-моделирования. Моделирование в CAD, 2D-разбивка 3D-модели CAD и формирование траектории инструмента являются неотъемлемыми этапами в любом процессе автоматизированного сварочного производства. В формате файла «.stl» 3D-модель легко нарезается на слои с помощью соответствующего программного обеспечения [22]. В современных установках автоматизированного сварочного производства применяется метод однонаправленной нарезки из-за его простоты. Однако этот метод имеет ограниченное применение для сложных конструкций, требующих большого количества опорных конструкций из-за сложной геометрической формы и нависающих элементов. Для минимизации использования опорных конструкций для сложных геометрических форм и нависающих элементов в последнее время в установках автоматизированного сварочного производства начали применять метод многонаправленной нарезки (MDS). При использовании этого метода нарезка выполняется таким образом, что манипулятор с несколькими координатными осями может осуществлять нанесение материала на базовую поверхность в любой ориентации, это позволяет осуществлять наплавку на нижнюю сторону выступа [16, 22]. Однако метод MDS требует использования многонаправленных наплавочных сопел, а его алгоритмы сложны, что требует полной настройки конфигурации робота [23].

Генерация траектории инструмента. Генерация траектории инструмента имеет решающее значение в процессе WAAM, поскольку она определяет движение наплавочного сопла для заполнения нарезанных 2D-слоев, представляющих поперечные сечения заготовки. Шаг смещения важен при создании траектории движения инструмента. Растровые и контурные шаблоны наиболее часто используются для методов сканирования в процессе WAAM. В растровом шаблоне смещение выполняется параллельно заданному направлению, в то время как для контурного изображения смещение происходит параллельно границе структуры. Остальные шаблоны пути представляют собой либо вариации, либо комбинации этих стратегий сканирования [24].

Наплавка методами GMAW, GTAW и PAW. Выбор метода наплавки определяется областью применения и простотой внедрения процесса. На выбор технологии наплавки влияют также требования к свойствам конечного изделия [25]. Так, способ GMAW применяется в случаях, когда приоритет отдается высокой производительности наплавки, а качество поверхности и стабильность процесса менее важны. Способ GMAW относительно проще внедрить, чем способы GTAW и PAW, поскольку он не требует отдельной подачи присадочной проволоки. Технология PAW обеспечивает высококачественные сварные швы точной формы и размера с минимальным искажением из-за высокой плотности энергии электрической дуги [26]. Деформация в результате процесса PAW минимальна. Несмотря на более высокую скорость наплавки, способ GMAW предпочтительнее для процесса WAAM, так как проволока подается соосно со сварочной горелкой, что упрощает выбор траектории инструмента. Тем не менее геометрически согласованная наплавка достижима для всех направлений движения, если угол подачи проволоки составляет 60 градусов [26].

Параметры наплавки (ток, напряжение, скорость подачи проволоки, скорость наплавки). Сварочные параметры, такие как ток, напряжение, скорость подачи проволоки и скорость наплавки, оказывают прямое влияние на сварной шов и качество наплавленной структуры. Они влияют на тепловой вклад в процессе наплавки [18]. Перенасыщение теплом во время наплавки приводит к переплавлению уже нанесенных слоев, что отрицательно сказывается на макроструктуре и геометрической форме валика. Снижение теплового вклада позволяет получить равномерную поверхность наплавки без излишнего наполнения или растекания сварочной ванны [19]. Кроме того, уменьшение теплового вклада уменьшает общую пористость наплавленной структуры за счет снижения температуры капель и уменьшения растворимости газа в расплаве [20]. Исследования макроструктуры при различных уровнях теплового вклада показали, что увеличение теплового вклада связано со снижением отношения скорости подачи проволоки к скорости перемещения инструмента [21]. В случае применения технологии WAAM важно уменьшить тепловой вклад и увеличить скорость наплавки, при этом скорость подачи проволоки должна быть пропорциональна тепловому вкладу.

Тепловой вклад в технологии WAAM оказывает значительное влияние на размер сварочной ванны. При сниженном тепловом вкладе соотношение ширины к высоте ванны уменьшается, поскольку ванна расплава не успевает расплываться до застывания. При повышенном тепловом вкладе вязкость металла уменьшается, а ванна расплава расширяется. Геометрические размеры между двумя последовательными слоями можно контролировать путем согласования охлаждения с тепловым вкладом [22].

Ток дуги существенно влияет на формирование наплавленной структуры и регулирует скорость плавления проволоки, глубину проплавления и геометрическую форму шва. Напряжение дуги также оказывает влияние на высоту и ширину структуры: при увеличении напряжения дуги увеличивается ширина и уменьшается высота [23, 24].

Выбор защитного газа. Для предотвращения образования дефектов и воздействия расплавленного металла на окружающую среду необходимо обеспечить достаточное количество защитного газа. Избыточный расход защитного газа может привести к плохому качеству сварного шва. При высокой скорости потока защитного газа, захваченные воздушные газы (кислород O_2 , азот N_2 , водяной пар H_2O) из-за турбулентности могут привести к образованию пор в наплавленной заготовке. Обычно защитный газ подается через сварочную горелку. Для наплавки материалов, склонных к окислению, таких как титан (Ti) и мартенситно-старяющиеся стали, используют заполненные газом защитные купола [25, 26]. Локальное устройство защиты, обеспечивающее ламинарный поток защитного газа, разработано для процесса WAAM из титанового сплава состава Ti-6Al-4V (Ti64), что более эффективно по сравнению с обычной системой защиты [26]. Состав защитного газа также является важным фактором при планировании процесса WAAM для предотвращения «блуждания» тока электрической дуги в материалах с высокой реактивностью, таких как алюминиевые и титановые сплавы. Использование защитного газа с добавкой O_2 обладает несколькими преимуществами, такими как увеличение скорости перемещения инструмента, более эффективное плавление ванны расплава и снижение поверхностного натяжения расплавленного металла [26]. Исследования [19, 20] влияния состава защитного газа на процесс наплавки алюминиевых сплавов показали, что защитная смесь аргона с добавлением 0,02 % O_2 снижает «блуждание» тока электрической дуги. В работе [21] по наплавке сплава системы Ti-Al-V с предварительно измельченными зёрнами использовали защитный газ, содержащий смесь аргона и гелия, что способствовало увеличению скорости охлаждения поверхности ванны расплава.

Выбор проволоки. Выбор диаметра проволоки и количества используемых проволок оказывает влияние на скорость наплавки, теплопередачу и общее качество сварного шва.

В исследовании [22] изучали микроструктуру и механические свойства сплава системы Al-Cu-Sn, наплавленного с использованием двойной проволоки. Результаты исследований показали, что прочность наплавленного металла увеличивается, а пористость снижается при использовании двух проволок, в отличие от использования одной проволоки.

Применение нескольких подающих проволок упрощает процесс выращивания биметаллических и интерметаллидных сплавов. Например, в работе [23] для изготовления интерметаллидного сплава TiAl успешно применили процесс WAAM на основе способа PAW с двойной проволокой. Кроме того, в исследовании [24] методом GTAW-WAAM с использованием двойной проволоки получен интерметаллидный сплав системы Fe-Al.

Качество поверхности проволоки также имеет существенное значение для уровня пористости конечного изделия. Применение проволоки высокого качества без поверхностных трещин и царапин приводило к снижению пористости в сварных соединениях в проведенном исследовании в работе [25].

Важными параметрами при выборе питающей проволоки в технологии WAAM являются также состав проволоки и наличие модификаторов. Различные исследования [26] демонстрируют положительное влияние модификаторов на структуру наплавленных материалов.

Материалы, применяемые в аддитивной технологии

Титановые сплавы. Детали из титановых сплавов пользуются большим спросом в авиастроении благодаря высокому уровню механических свойств при небольшой

плотности. Из-за плохой обрабатываемости и высокой стоимости титановых сплавов возникла потребность в эффективных технологиях, альтернативных традиционным методам производства. При изготовлении деталей сложной конфигурации из сложнолегированных титановых сплавов аддитивные технологии имеют значительное преимущество – обеспечивают более высокий коэффициент использования материала (по сравнению с традиционными технологиями), что позволяет существенно снизить стоимость конечных деталей и сборочных единиц [22]. В статьях [23, 24] рассматривается процесс наплавки WAAM на основе сплава состава Ti–6Al–4V с использованием способа GTAW. Образцы с наплавкой WAAM показали хорошие механические свойства с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 884 \pm 27$ МПа, пределом прочности при растяжении $\sigma_b = 995 \pm 29$ МПа и относительным удлинением $\delta = 18,6$ %, что оказалось сопоставимым со свойствами деформируемого материала, у которого $\sigma_{0,2} = 880–920$ МПа, $\sigma_b = 900–950$ МПа, $\delta = 5–18$ %.

Сплавы на основе никеля. Никелевые сплавы обладают высокими эксплуатационными характеристиками, прочностью и ударной вязкостью при высоких температурах и устойчивы к агрессивным средам. Они применяются в авиационных двигателях, камерах сгорания и турбинах. Аддитивно изготовленные никелевые сплавы находят применение в аэрокосмической, авиационной и нефтяной промышленности [25]. В настоящее время два жаропрочных сплава на основе никеля (Inconel 718 и Inconel 625) активно изучают для процессов, основанных на технологии WAAM. Микроструктура сплава Inconel 718, изготовленного методом WAAM, обычно состоит из крупных столбчатых зерен с выделениями неправильной островной формы, известных как фазы Лавеса, и некоторых карбидов сферической/квадратной формы.

В работе [26] проводили исследование технологии WAAM сплава Inconel 718 в состоянии термической обработки и сравнили его коррозионную стойкость с аналогичной характеристикой деформированного сплава той же марки. Изучение материала показало, что этот сплав после наплавки WAAM и термической обработки обладает более низкой коррозионной стойкостью (по сравнению с деформированным сплавом той же марки) из-за образования пористого пассивного слоя, содержащего большее количество оксида NiO и меньшее количество оксида Cr₂O₃, на поверхности сплава Inconel 718 после наплавки WAAM и термической обработки. В исследовании [17] показано, что у напавленного методом WAAM на основе процесса СМТ термически обработанного сплава Inconel 718 более стабильное поведение и удовлетворительные характеристики по сравнению со сплавом, полученным методом лазерной аддитивной печати.

В работе [18] рассмотрено применение процессов WAAM для изготовления образцов из сплава Inconel 625. Выявлено, что механические свойства полученного сплава существенно зависят от скорости перемещения горелки из-за образования выделений. Нижние слои образцов представлены в основном мелкозернистой структурой, в то время как со временем структура меняется на столбчатую дендритную с вторичными ответвлениями. Верхние слои имеют равноосную микроструктуру. После термической обработки сплава Inconel 625, изготовленного методом WAAM при температуре 1100 °С, произошло растворение фаз Лавеса, а также исчезновение классической дендритной микроструктуры [19].

Опыт НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области разработки технологии WAAM для создания заготовок из сплава ЭП718 показал высокий уровень механических свойств синтезированного сплава после горячего изостатического прессования и термической обработки: $\sigma_b = 1190$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1030$ МПа, $\delta_5 = 18,5$ %, предел кратковременной прочности при температуре 700 °С составлял 910 МПа, длительная прочность при нагрузке 400 МПа при той же температуре – более 100 ч.

Алюминиевые сплавы. После проведения нескольких исследований процесса изготовления алюминиевых сплавов по технологии WAAM сделан вывод, что этот процесс подходит в основном для производства крупногабаритных алюминиевых конструкций сложной геометрической формы. Различные марки алюминиевых сплавов, включая сплавы систем Al–Cu (2xxx), Al–Si (4xxx) и Al–Mg (5xxx), изучены для производства с использованием технологии WAAM. Некоторые марки, такие как серий 6xxx и 7xxx, имеют ограничения по сварке из-за несозревающей ванны расплава во время наплавки [20, 21]. Среди различных методов WAAM процесс СМТ на основе способа GMAW признан наиболее подходящим для изготовления алюминиевых сплавов благодаря своему эффективному энергосбережению.

В работе [22] продемонстрированы результаты успешной наплавки бездефектной тонкостенной детали из сплава марки ER4043 с применением технологии WAAM на основе процесса СМТ. При использовании оптимизированных параметров процесса получена бездефектная и полностью плотная деталь. Средняя прочность при растяжении изготовленных образцов составила 125 МПа в продольном и 112 МПа в поперечном направлениях, что сопоставимо с прочностью холоднотянутых образцов.

Стали. В настоящее время технологии WAAM уделяется внимание в ряде исследований по производству нержавеющей стали, благодаря ее способности обеспечить высокую пластичность и хорошую коррозионную стойкость металлу. По этой технологии можно производить прочные и бездефектные заготовки деталей с отличными механическими свойствами и микроструктурой. Например, в работе [23] использована технология WAAM на основе способа GMAW для наплавки нержавеющей стали марки 308L с хорошими механическими свойствами. Анизотропия в деталях может успешно устраняться с помощью подходящих процессов термической обработки, изменения вариантов процесса или использования модели ортотропного материала, что продемонстрировано в работе [24].

С помощью технологии WAAM производят комбинированную микроструктуру, состоящую из крупных столбчатых аустенитных зерен и мелких ферритных зерен скелетной, речной и зернистой формы [25]. Коррозионная стойкость обработанной методом WAAM супердуплексной нержавеющей стали марки ER2594 (SDSS) превосходит стойкость деформируемого сплава [26].

Другие сплавы. Исследования в области изготовления заготовок из магниевых сплавов с использованием аддитивного производства с проволоочной электрической дугой все еще недостаточны, и большая часть работ в области технологии WAAM выполняется на сплавах марок AZ31 и AZ91 [17]. Изготовленный методом WAAM образец из сплава AZ91 в основном состоял из равноосных зерен разного размера, с общим размером зерен, равным 13,9 и 33,2 мкм выше и ниже линии сплавления соответственно, что значительно меньше размера зерен в литом материале (44,4 мкм) [25].

Образцы, изготовленные с помощью технологии WAAM по методике Янга, не имели выявленных дефектов, обладали лучшими механическими свойствами (предел текучести 131 МПа, предел прочности при растяжении 210 МПа и относительное удлинение 10,55 %), чем традиционные литейные сплавы, и были сравнимы по свойствам с деформируемыми сплавами.

Проблемы при применении технологии WAAM

Остаточные напряжения и деформации. Значительные остаточные напряжения могут привести к деформации конструкции и быстрому разрушению изделия, а также потере геометрического допуска и снижению сопротивления усталости. Минимизация и контроль деформации, вызванной остаточными напряжениями, является важной областью исследований.

Размер подложки, используемой в технологии WAAM, и установленная система фиксации значительно влияют на продольные остаточные напряжения в структуре [21]. В работе [22] показано, что характер наплавки и длина трека оказывают влияние на остаточные напряжения. Исследования показали, что короткие треки способствуют уменьшению остаточных напряжений, в то время как спиральные пути приводят к наибольшим значениям остаточных напряжений и деформации.

Пористость. Пористость, вызванная технологическим процессом или сырьем, является дефектом, который необходимо уменьшить для предотвращения отрицательного влияния на механические свойства компонентов, изготовленных по технологии WAAM. Она возникает из-за захвата газообразного водорода в расплавленной ванне во время наплавки. Эту пористость можно в некоторой степени контролировать за счет использования подходящего состава защитного газа и методов нанесения. Наличие поверхностных загрязнений в сырье, таких как влага и жир, также является причиной образования пористости в наплавленной структуре. Кроме того, наличие пористости зависит от количества поданного тепла.

Исследования, представленные в работе [23], показывают, что в импульсном методе MIG меньшая погонная энергия приводит к более высокому уровню пористости, в то время как более высокая погонная энергия приводит к относительно меньшей пористости. Однако противоположные результаты получены в компонентах, изготовленных по технологии WAAM на основе процесса СМТ.

В работе [24] получены аналогичные результаты для процессов СМТ, СМТ + Pulse и СМТ + Advanced, где наивысший уровень подводимого тепла в процессе СМТ + Pulse привел к наибольшему образованию пор. Образование крупных столбчатых зерен также способствует предотвращению выхода пор из ванны расплава. Кроме подачи тепла, режим трансфера металла также оказывает значительное влияние на пористость конструкций, изготовленных с использованием технологии WAAM. В статье [25] демонстрируется, что при производстве сплава марки 5356Al применение импульсного режима переменного тока существенно снижает пористость, которая достигает уровня 0,13 % благодаря его переменной полярности. Полученные результаты почти в 6 раз меньше, чем при холодном трансфере металла, и в ~10 раз меньше, чем при режиме Pulsed-GMAW.

Трещины, расслоения. Растрескивание при затвердевании в основном происходит из-за избыточной сегрегации растворенных веществ, которая создает препятствия при затвердевании ванны расплава [26]. Присутствие таких дефектов отрицательно сказывается на механических свойствах изготовленной конструкции. В исследовании [17] рассмотрено влияние трещин на вязкость разрушения сплава Inconel 718, произведенного методом WAAM. Показано, что ударная вязкость сплава, изготовленного по технологии WAAM, на образцах с надрезом, параллельным трещиноподобному дефекту, почти в 2 раза меньше, чем у ковального сплава Inconel 718, но сопоставима с ним при перпендикулярном расположении надреза и трещиноподобного дефекта.

Анизотропия свойств. В процессе WAAM затвердевание способствует формированию микроструктуры с крупными столбчатыми зернами вместо мелкой равномерной микроструктуры. Это обусловлено более высоким температурным градиентом и меньшей скоростью роста на границе раздела «твердое тело/жидкость», что способствует формированию столбчатой морфологии зерен [26]. Наиболее заметным недостатком крупной столбчатой микроструктуры является наличие анизотропии механических свойств материала. В исследовании [26] изучалась анизотропия в высокопрочных стальных заготовках, изготовленных на основе процесса СМТ по технологии WAAM. Сделан вывод о более низких свойствах при разрушении в продольном направлении по сравнению с поперечным.

Методы улучшения качества производимой конструкции

Термическая и газостатическая обработка. Термическая обработка после изготовления имеет важное значение в технологии WAAM для повышения прочности материала, снижения остаточных напряжений и контроля твердости изготовленной конструкции. В работе [20] отмечается, что механическая прочность алюминиевого сплава марки AA2196, полученного методом WAAM на основе способа GTAW, увеличилась на 59 % после соответствующей последующей термической обработки и горячей деформации. Повышение свойств при растяжении связано с измельчением зерен и механизмом закрытия микропор, поскольку постобработка эффективно уменьшила пористость и устранила места зарождения трещин.

В других исследованиях, проведенных после последующей термической обработки компонентов, изготовленных с использованием технологии WAAM, сообщается об увеличении прочности на 4; 5; 78 и 17 % для титановых сплавов [21], жаропрочных сплавов на основе никеля [22, 23], алюминиевых сплавов [24] и интерметаллидных сплавов Ti/Al [25] соответственно.

Послойное (межпроходное) охлаждение. Сложный термический профиль заготовок, изготовленных методом WAAM, который включает повторяющиеся циклы нагрева и охлаждения, может привести к формированию сложных микроструктур и ухудшению механических свойств.

Для достижения улучшенной микроструктуры и повышенных механических свойств разработаны методы межпроходного охлаждения, включающие принудительное охлаждение с использованием сжатого газа CO₂. Быстрое охлаждение достигается благодаря использованию подвижного сопла для подачи газа, поэтому температура слоя, а также термический цикл могут быть изменены в желаемой области для получения требуемой микроструктуры и механических свойств.

Исследования, представленные в работе [26], по изготовлению сплава состава Ti-6Al-4V с использованием принудительного межпроходного охлаждения сжатым CO₂ показали многообещающие результаты. Оказалось, что этот процесс способствует улучшению микроструктуры, снижению окисления, увеличению твердости и укреплению материала. В работе [17] предложен метод активного охлаждения с использованием сухого сжатого воздуха при изготовлении сплава марки SS308L по технологии WAAM и получены положительные результаты, такие как самая низкая шероховатость поверхности, увеличение средней твердости и большая прочность при растяжении по сравнению с деталями, изготовленными без использования активного охлаждения.

Послойная холодная прокатка. Применение такой прокатки для наплавленных структур позволяет существенно снизить микроструктурную анизотропию за счет механизма пластической деформации материала. Исследования показали, что послойная холодная прокатка наплавленных валиков также успешно снижает остаточные напряжения и деформацию [18].

В статье [19] представлена интегрированная система метода WAAM для холодной прокатки, в которой гидравлически нагруженный целевой ролик перемещался по наплавленной металлической структуре с постоянной скоростью, аналогично сварочной горелке в процессе GMAW. Этот метод оказался эффективным для уменьшения деформации и повышения качества поверхности наплавленной структуры, минимизируя необходимость в дополнительной механической обработке конечного изделия. Подогрев прокатанного слоя и последующее нанесение слоя способствовали полезному измельчению зерен материала.

Исследования в статье [20] подтвердили положительное влияние послойной холодной прокатки при производстве сплавов состава Ti-6Al-4V методом WAAM.

Удалось достичь улучшения характеристик, таких как предел прочности при растяжении (876 МПа), предел текучести (789 МПа) и относительное удлинение (11 %), что превзошло показатели для образцов, полученных методом WAAM, в исходном состоянии. Увеличение прочности и пластичности связано с устранением пустот и повышением плотности дислокаций за счет послойной прокатки.

Аналогичные результаты получены в работе [21] при изготовлении сплава Inconel 718 методом WAAM. В настоящее время этот метод используется только для изготовления простых деталей с тонкими стенками из-за геометрических ограничений процессов прокатки в рабочей камере установки. Внедрение послойной прокатки при изготовлении готовых к использованию компонентов методом WAAM остается недоступным из-за этих ограничений.

Заключения

Технология WAAM привлекает внимание отечественных промышленных специалистов и исследователей из-за своей низкой стоимости, высоких производительности и коэффициента использования материала при изготовлении крупногабаритных деталей средней сложности.

Качество изготовления и свойства материала, полученного методом WAAM, существенно зависят от реализации выбранного метода и планирования обработки, поэтому пристальное внимание уделяется этапам и стратегии обработки параметров и инструментов. Для решения проблем возникновения анизотропной и столбчатой микроструктур в процессе WAAM необходим выбор подходящего сырья, правильное управление скоростью охлаждения с дополнительным межпроходным охлаждением и деформациями, что имеет решающее значение и дает многообещающие результаты. Поскольку микроструктура оказывает огромное влияние на механические свойства изготовленных материалов, необходимо провести более целенаправленные исследования в этой области для их внедрения в производство продуктов конечного использования.

В настоящее время имеется множество направлений для исследований в области технологии WAAM: разработка новых сплавов, таких как сплавы с высокой энтропией и магнитные сплавы; производство биметаллических сплавов и их обработка. Отмечается, что очень мало исследований проводится для отслеживания правильности геометрической формы изделий и образования дефектов во время изготовления методом WAAM. Автоматическая проверка дефектных заготовок после изготовления приводит к более высоким потерям материала и связанным с этим затратам. Поэтому подчеркивается потребность в замкнутой системе управления для обнаружения дефектов в реальном времени, что сократит общее время постобработки и сделает технологию WAAM более надежным и эффективным методом.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // Электрометаллургия. 2022. № 1. С. 2–12.
2. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 2. Компенсация и контроль отклонений, ГИП и термическая обработка // Электрометаллургия. 2022. № 2. С. 2–12.

3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С., Дынин Н.В. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 3. Адаптация и создание материалов // *Электротехнология*. 2022. № 4. С. 15–25.
4. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 4. Разработка жаропрочных материалов // *Электротехнология*. 2022. № 5. С. 8–19.
5. Ходыкин Л.Г., Няфкин А.Н., Косолапов Д.В., Жабин А.Н. Лазерная сварка металлических композиционных материалов на основе алюминиевого сплава, армированного тугоплавкими частицами SiC (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 12 (118). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-63-75.
6. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Свиридов А.В., Грибков М.С. Особенности электронно-лучевой сварки жаропрочных сплавов ЭИ698-ВД и ЭП718-ИД со сталью 45 // *Труды ВИАМ*. 2020. № 9 (91). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-3-14.
7. Пантелеев М.Д., Свиридов А.В., Скупов А.А., Одинцов Н.С. Освоение перспективных технологий сварки высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 применительно к элементам фюзеляжа // *Труды ВИАМ*. 2020. № 12 (94). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-35-46.
8. Пантелеев М.Д., Свиридов А.В., Неруш С.В., Бондаренко С.В., Мостяев И.В. Особенности свариваемости жаропрочных алюминиевых сплавов // *Труды ВИАМ*. 2023. № 12 (130). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-28-37.
9. Бенариев И., Антипов В.В., Хасиков Д.В., Оглодков М.С., Савичев И.Д., Кузнецова П.Е. Исследование структуры и свойств экономнолегированного алюминиевого сплава системы Al–Mg–Sc–Zr, изготовленного методом селективного лазерного сплавления // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-23-35.
10. Колядов Е.В., Висик Е.М., Герасимов В.В., Битюцкая О.Н. Особенности морфологии структуры жаропрочного никелевого сплава в зависимости от величин осевого и радиального градиентов температуры на фронте кристаллизации // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
11. Оглодков М.С., Щетинина Н.Д., Рудченко А.С., Пантелеев М.Д. Направления развития перспективных алюминий-литиевых сплавов для авиационно-космической техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 19–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-19-29.
12. Скупов А.А., Свиридов А.В., Голев Е.В., Стекольников Е.Ю. Лазерная сварка жаропрочного сплава на никелевой основе для элементов газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-3-13.
13. Ding J., Colegrove P., Mechnen J. et al. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer Manufacturing process on large multi-layer parts // *Computational Materials Science*. 2011. Vol. 50. No.12. P. 3315–3322.
14. Pattanayak S., Sahoo S.K. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. No. 33 P. 398–442. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010.
15. 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. No. 35. P. 127–139.

16. Spencer J., Dickens P., Wykes C. Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 1998. Vol. 212. No. 3. P. 175–182.
17. Wang Y., Chen X., Konovalov S.V. Additive manufacturing based on welding arc: a low-cost method // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron Neutron Technologies. 2017. No. 11. P. 1317–1328. DOI: 10.1134/S1027451017060210.
18. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // The International Journal of Advanced Manufacturing Technologies. 2015. No. 81. P. 465–481. DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3.
19. Artaza T., Suarez A., Veiga F. et al. Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres // Journal of Materials Research Technologies. 2020. No. 9. P. 15454–15466. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.11.012.
20. Singh P., Dutta D. Multi-direction slicing for layered manufacturing // Journal of Computing and Information Science in Engineering. 2001. No. 1. P. 129–142. DOI: 10.1115/1.1375816.
21. Jafari D., Vaneker T.H.J., Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts // Material Design. 2021. Vol. 202. No. 109471. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109471.
22. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2015. No. 34. P. 8–19. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.01.003.
23. Artaza T., Suarez A., Murua M. Wire arc additive manufacturing of Mn4Ni2CrMo steel: comparison of mechanical and metallographic properties of PAW and GMAW // Procedia Manufacturing. 2019. No. 41. P. 1071–1078. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.10.035.
24. Ahiale G.K., Oh Y.-J., Choi W.-D. et al. Microstructure and fatigue resistance of high strength dual phase steel welded with gas metal arc welding and plasma arc welding processes // Metals and Materials International. 2013. No. 19. P. 933–939. DOI: 10.1007/s12540-013-5005-3.
25. Wu Q., Lu J., Liu C. et al. Obtaining uniform deposition with variable wire feeding direction during wire-feed additive manufacturing // Materials Manufacturing Processes. 2017. No. 32. P. 1881–1886. DOI: 10.1080/10426914.2017.1364860.
26. Wu B., Ding D., Pan Z. et al. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V // Journal of Material Processing Technology. 2017. No. 250. P. 304–312. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037.

References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE «VIAM». Part 1. Materials and synthesis technologies. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 1, pp. 2–12.
2. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE «VIAM». Part 2. Compensation and control of deviations, GIP and heat treatment. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 2, pp. 2–12.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S., Dynin N.V. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE «VIAM». Part 3. Adaptation and creation of materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 4, pp. 5–25.
4. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE «VIAM». Part 4. Development of heat-resistant materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 5, pp. 8–19.
5. Khodykin L.G., Nyafkin A.N., Kosolapov D.V., Zhabin A.N. Laser welding of metal composite materials based on aluminium alloy reinforced with refractory particles SiC (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 23, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-63-75.

6. Kablov E.N., Antipov V.V., Sviridov A.V., Gribkov M.S. Features of electron beam welding of heat-resistant alloys EI698-VD and EP718-ID with steel 45. *Trudy VIAM*, 2020, no. 9 (91), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-3-14.
7. Panteleev M.D., Sviridov A.V., Skupov A.A., Odintsov N.S. Perspective welding technologies of aluminum-lithium alloy V-1469 applied to fuselage panels. *Trudy VIAM*, 2020, no. 12 (94), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-35-46.
8. Panteleev M.D., Sviridov A.V., Nerush S.V., Bondarenko S.V., Mostyaev I.V. Weldability features of heat-resistant aluminum alloys. *Trudy VIAM*, 2023, no. 12 (130), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-12-28-37.
9. Benarieb I., Antipov V.V., Khasikov D.V., Oglodkov M.S., Savichev I.D., Kuznetsova P.E. Study of structure and properties of sparsinly alloyed aluminum alloy of Al–Mg–Sc–Zr system, produced by selective laser melting. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-23-35.
10. Kolyadov E.V., Visik E.M., Gerasimov V.V., Bityutskaya O.N. Features of the morphology of the structure of nickel superalloy depending on the values of the axial and radial temperature gradients at the crystallization front. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
11. Oglodkov M.S., Shchetinina N.D., Rudchenko A.S., Panteleev M.D. Directions of the development of promising aluminum-lithium alloys for aero-space engineering (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 19–29. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-19-29.
12. Skupov A.A., Sviridov A.V., Golev E.V., Stekolnikova E.Yu. Laser welding of heat-resistant alloy nickel base for gas turbine elements engines. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-3-13.
13. Ding J., Colegrove P., Mechnen J. et al. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer Manufacturing process on large multi-layer parts. *Computational Materials Science*, 2011, vol. 50, no.12, pp. 3315–3322.
14. Pattanayak S., Sahoo S.K. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, no. 33, pp. 398–442. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010.
15. 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, no. 35, pp. 127–139.
16. Spencer J., Dickens P., Wykes C. Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 1998, vol. 212, no. 3, pp. 175–182.
17. Wang Y., Chen X., Konovalov S.V. Additive manufacturing based on welding arc: a low-cost method. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron Neutron Technologies*, 2017, no. 11, pp. 1317–1328. DOI: 10.1134/S1027451017060210.
18. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 2015, no. 81, pp. 465–481. DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3.
19. Artaza T., Suarez A., Veiga F. et al. Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres. *Journal of Materials Research Technologies*, 2020, no. 9, pp. 15454–15466. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.11.012.
20. Singh P., Dutta D. Multi-direction slicing for layered manufacturing. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2001, no. 1, pp. 129–142. DOI: 10.1115/1.1375816.

21. Jafari D., Vaneker T.H.J., Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Material Design*, 2021, vol. 202, no. 109471. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109471.
22. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H. A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, no. 34, pp. 8–19. DOI: 10.1016/j.rcim.2015.01.003.
23. Artaza T., Suarez A., Murua M. Wire arc additive manufacturing of Mn4Ni2CrMo steel: comparison of mechanical and metallographic properties of PAW and GMAW. *Procedia Manufacturing*, 2019, no. 41, pp. 1071–1078. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.10.035.
24. Ahiale G.K., Oh Y.-J., Choi W.-D. et al. Microstructure and fatigue resistance of high strength dual phase steel welded with gas metal arc welding and plasma arc welding processes. *Metals and Materials International*, 2013, no. 19, pp. 933–939. DOI: 10.1007/s12540-013-5005-3.
25. Wu Q., Lu J., Liu C. et al. Obtaining uniform deposition with variable wire feeding direction during wire-feed additive manufacturing. *Materials Manufacturing Processes*, 2017, no. 32, pp. 1881–1886. DOI: 10.1080/10426914.2017.1364860.
26. Wu B., Ding D., Pan Z. et al. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *Journal of Material Processing Technology*, 2017, no. 250, pp. 304–312. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037.

Информация об авторах

Свиридов Александр Владимирович, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Фомичева Ольга Владимировна, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Голев Евгений Викторович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Козырева Ольга Евгеньевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Aleksander V. Sviridov, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga V. Fomicheva, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeny V. Golev, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Olga E. Kozyreva, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.12.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 27.01.2025.
The article was submitted 24.12.2024; approved and accepted for publication after reviewing 27.01.2025.