

УДК 621.791.92; 621.791.754.4

Разработка и исследование технологии изготовления металлических конструкций с использованием аддитивной наплавки

В.В. Григорьев¹, Н.О. Плетнев¹, Р.С. Шанин²

¹ Комсомольский-на-Амуре государственный университет

² ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация» — Комсомольский-на-Амуре авиационный завод имени Ю.А. Гагарина

Design, development and study of a technology for manufacturing metal structures using the additive surfacing

V.V. Grigorev¹, N.O. Pletnev¹, R.S. Shanin²

¹ Komsomolsk-na-Amure State University

² PJSC United Aircraft Corporation — Komsomolsk-on-Amur Aviation Plant named after Yu.A. Gagarin

Предложена технология послойной аддитивной наплавки трех различных заготовок. Полученные заготовки имеют сложную конфигурацию: цилиндрическую, усеченной сферы и плоскокриволинейной. Заготовки изготовлены с использованием ЧПУ станка портального типа в комбинации со сварочным инвертором. Выполнено лазерное 3D-сканирование заготовок с определением отклонений их толщины в поперечном сечении. Определены микроструктура заготовок и распределение микротвердости. Обнаружена неравномерность наплавленных слоев в поперечном сечении заготовок. Структура полученных образцов соответствует ферритно-перлитной смеси. Выявлено, что размер зерна увеличивается от нижних слоев к верхним, а микротвердость в поперечном сечении образцов уменьшается от верхних слоев к нижним. Установлено, что для обеспечения гомогенности структуры необходим предварительный и сопутствующий подогрев в процессе аддитивной наплавки. Результаты исследований могут быть применены в технологических процессах аддитивной наплавки.

EDN: DKXKNK, <https://elibrary/dkxknk>

Ключевые слова: аддитивная наплавка, микроструктура образца, микротвердость в поперечном сечении, лазерное 3D-сканирование

The paper proposes a technology of the layer-by-layer additive surfacing of three different workpieces. The resulting workpieces have a complex configuration: cylindrical, truncated spherical, and flat-curved. The workpieces are manufactured using the portal-type CNC machine in combination with the welding inverter. Laser 3D scanning of the workpieces is performed to determine their thickness deviations in the cross sections. The workpieces microstructure and the micro-hardness distribution are determined. The deposited layers unevenness in the workpieces' cross sections is identified. The obtained samples structure corresponds to the ferrite-pearlite mixture. The paper shows that the grain size increases from the lower layers to the upper ones, and the micro-hardness in the samples' cross sections decreases from the upper layers to the lower ones. It indicates that preliminary and concomitant heating in the additive surfacing process is required to ensure the structure homogeneity. The study results could be applied in technological processes of the additive surfacing.

EDN: DKXKNK, <https://elibrary/dkxknk>

Keywords: additive surfacing, sample microstructure, cross-sectional micro-hardness, laser 3D scanning

Аддитивная наплавка — актуальная технология, используемая в машиностроении, при производстве инструментов, строительстве и ремонте металлических изделий. Эта технология позволяет создавать детали с высокой точностью и минимальными отходами, восстанавливать изношенные поверхности и улучшать свойства материалов. Аддитивную наплавку постоянно совершенствуют для нужд разных отраслей [1, 2].

В последние годы наблюдается увеличение объема изделий, производимых с помощью аддитивных технологий [3, 4].

На сегодняшний день существуют основные виды аддитивного выращивания металлических изделий [5]. К ним относятся следующие виды аддитивной наплавки: лазерная, электронно-лучевая, плазменная и дуговая [6–10].

В основу дуговой аддитивной наплавки (ДАН) положена электродуговая наплавка в среде защитного газа [11–14], которую отличают высокая производительность послойного выращивания, доступность технологий, материалов и относительно невысокая стоимость оборудования [10].

При ДАН применяют G-коды, представляющие собой программный язык управления (ЧПУ). G-коды позволяют управлять перемещением сварочной головки, включением источника питания, назначать сварочный ток, создавать паузы в движении (например, в начале наплавки для достижения нужных размеров сварочной ванны), включать подачу сварочной проволоки

посредством последовательного ввода различных буквенно-цифровых индексов [15].

Цель работы — получение металлических конструкций сложной конфигурации методом ДАН в среде защитных газов и изучение их свойств.

Методика исследования. Для возможности использования имеющегося оборудования проведена модернизация трехмерного портального станка плазменной резки, управляемого программой Mach3 для автоматической дуговой сварки/наплавки в среде защитного газа.

Замена базового рабочего органа — плазматрона — сварочной горелкой полуавтомата СВАРОГ MIG 3500 (J93) потребовала разработки специального кронштейна, позволяющего размещать горелку на исполнительном механизме и регулировать ее положение относительно оси наплавки (рис. 1). В качестве защитного газа использован баллон с углекислым газом вместимостью 40 л по ГОСТ 949–73.

Для проектирования и изготовления выбраны три детали разной формы: цилиндрической, усеченной сферы и плоскокриволинейной. Проектирование выполняли в программном комплексе T-FLEX CAD.

Для управления процессом наплавки использовали ноутбук с программой Mach 3, разработанной для управления станком посредством G-кодов и автономного контроля за оборудованием. Приложение способно управлять одновременно шестью координатами.

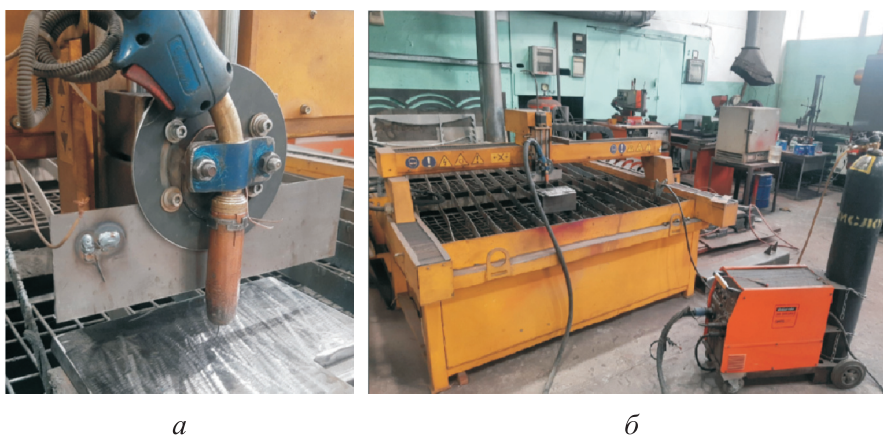


Рис. 1. Внешний вид кронштейна крепления сварочной горелки (а) и комплектации станка для ДАН (б)



а



б



в

Рис. 2. Внешний вид изделий разной формы, полученных методом ДАН:
а — цилиндрической; б — усеченной сферы;
в — плоскокриволинейной

Для каждой наплавки подготавливали и механически обрабатывали заготовку из стали Ст3, предназначенную для поддержки наплавляемой заготовки.

Для наплавки применяли омедненную стальную проволоку сплошного сечения Св-08ГА-О диаметром 1,2 мм (по ГОСТ 2246–70),

выбор которой обоснован имеющимися ресурсами. Несомненно, для создания более надежных конструкций необходима проволока с высоким содержанием раскислителей.

В процессе ДАН сварочную горелку поднимали на величину наплавленного валика для перехода на следующий слой, сгенерированный G-кодами.

Режимы ДАН приведены в таблице, а полученные этим методом изделия — на рис. 2. В процессе ДАН возможен обрыв дуги и смещение наплавленных слоев под действием силы тяжести, поэтому выбор режимов наплавки обоснован ранее полученными заготовками прямолинейной формы и программами управления [1, 14, 16].

Геометрические характеристики заготовок оценивали с помощью мобильного измерительного манипулятора Nikon MSAx с лазерным сканером для получения цифровых моделей наплавленных образцов и их поперечных сечений. Для сбора полученных данных использовали программное обеспечение Focus.

Наплавленную заготовку цилиндрической формы подвергали токарной обработке, чтобы определить ее обрабатываемость и выявить подповерхностные дефекты после наплавки.

Микроструктуру исследовали на образце плоскокриволинейной формы. Его раскрой для дальнейшего изучения микроструктуры наплавленных валиков выполняли угловой шлифовальной машиной. Внешний вид раскроенного образца показан на рис. 3.

Для исследования микроструктуры требовалась пробоподготовка, которую проводили на шлифовально-полировальном станке EcoMet 250 с полуавтоматической насадкой AutoMet 250. Далее образцы промывали и обрабатывали спиртом для удаления загрязнений и остатков абразивного вещества.

После окончания полировки образцы подвергали макротравлению с целью проявления структуры наплавленных валиков. Травление

Режимы ДАН заготовок

Форма заготовки	Сила тока, А	Напряже- ние, В	Скорость наплавки, мм/мин	Скорость пода- чи проволоки, м/мин	Число проходов	Расход газа, л/мин
Плоскокриволинейная	100...250	20	800	1,5...2,5	23	10,0
Усеченная сфера		21			32	7,5
Цилиндрическая					12	

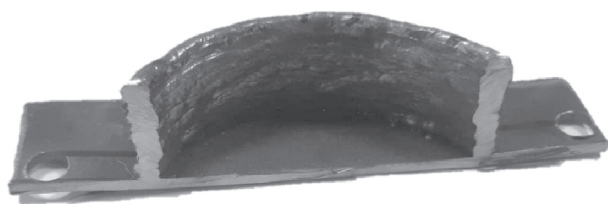


Рис. 3. Внешний вид раскроенного образца для дальнейшего изучения микроструктуры наплавленных валиков

выполняли в течение одной минуты в реактиве Гейна, в состав которого входили 85 г хлорной меди, 53 г хлорида аммония и 1000 мл воды, после чего образцы промывали водой и обезживали в спирте.

Микроструктуру образцов изучали при различном увеличении ($\times 100$, $\times 400$ и $\times 1000$) с использованием металлографического микроскопа Nikon MA200.

Микротвердость измеряли в поперечном сечении наплавленных валиков с помощью микротвердомера DUH-211/211S компании SHIMADZU с программным обеспечением HNV-AD. Исследования выполняли в центральной части макрошлифа от последнего наплавленного слоя до подложки.

Результаты исследования и их обсуждение. После токарной обработки образца цилиндрической формы установлено, что обрабатываемость является удовлетворительной, подпо-



Рис. 4. Внешний вид цилиндрического образца, полученного методом ДАН, после токарной обработки

верхностных дефектов и расслоений между наплавленными слоями не обнаружено. Внешний вид образца цилиндрической формы, полученного методом ДАН, после токарной обработки показан на рис. 4.

Цифровые модели образцов и размеры их поперечных сечений с указанием отклонений, полученные после лазерного сканирования, приведены на рис. 5, а–е.

По результатам лазерного сканирования установлено, что в поперечных сечениях заготовок имеются отклонения, наплавленные слои — неравномерные. Наибольшее утонение стенки наблюдается в первых слоях заготовок, что может быть связано с неравномерным нагревом в процессе наплавки первоначальных

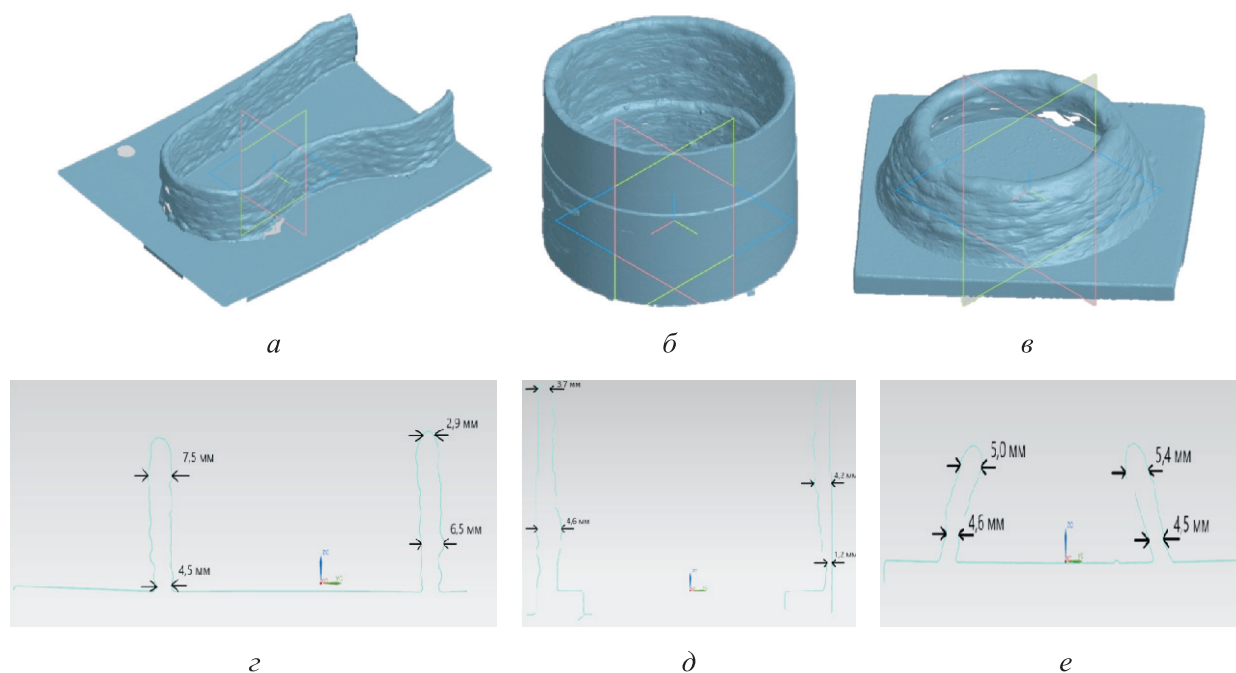


Рис. 5. Цифровые модели образцов разной формы (а–в) и размеры их поперечных сечений (з–е): а, з — плоскокриволинейной; б, д — цилиндрической; в, е — в виде усеченной сферы

слоев и отводом теплоты в подложку. На участках выше видно, что форма валиков имеет уклоны, а также явные выступы на торцах образца. На верхнем участке валики имеют заваленную форму, причиной которой мог послужить прогиб металла в процессе наплавки под действием силы тяжести и давления сварочной дуги.

Макро- и микроструктуры образца плоскокриволинейной формы в точке начала наплавки и на расстоянии 120 мм от нее при увеличении $\times 400$ приведены на рис. 6, а и б.

Анализ структуры образца в точке начала наплавки (см. рис. 6, а) на первом слое выявил наличие дефекта в виде «несплавления». Образование такого дефекта характерно для места начала ДАН из-за недостаточной температуры нагрева. Для предотвращения образования этого дефекта необходима пауза перед наплавкой, чтобы сформировалась сварочная ванна. Также

в зоне термического влияния видно изменение размера и формы зерен под действием сварочной дуги.

В нижних участках образца имеются относительно равномерно распределенные более крупные участки перлита, а также малая строчечность зернистого перлита. Крупные участки перлита и малая строчечность зернистого перлита в наплавленном металле возникают в результате эвтектоидного превращения аустенита при температуре 727°C и одновременном зарождении и росте двух новых фаз: феррита и цементита.

Ближе к центральной части образца обнаружена выраженная структура с большим количеством длинных игл, идущих от сетки феррита по границам зерен, а также однородная ферритно-перлитная структура без видимых признаков видманштетта. Структура с длинными иглами формируется вследствие вторичной кристалли-

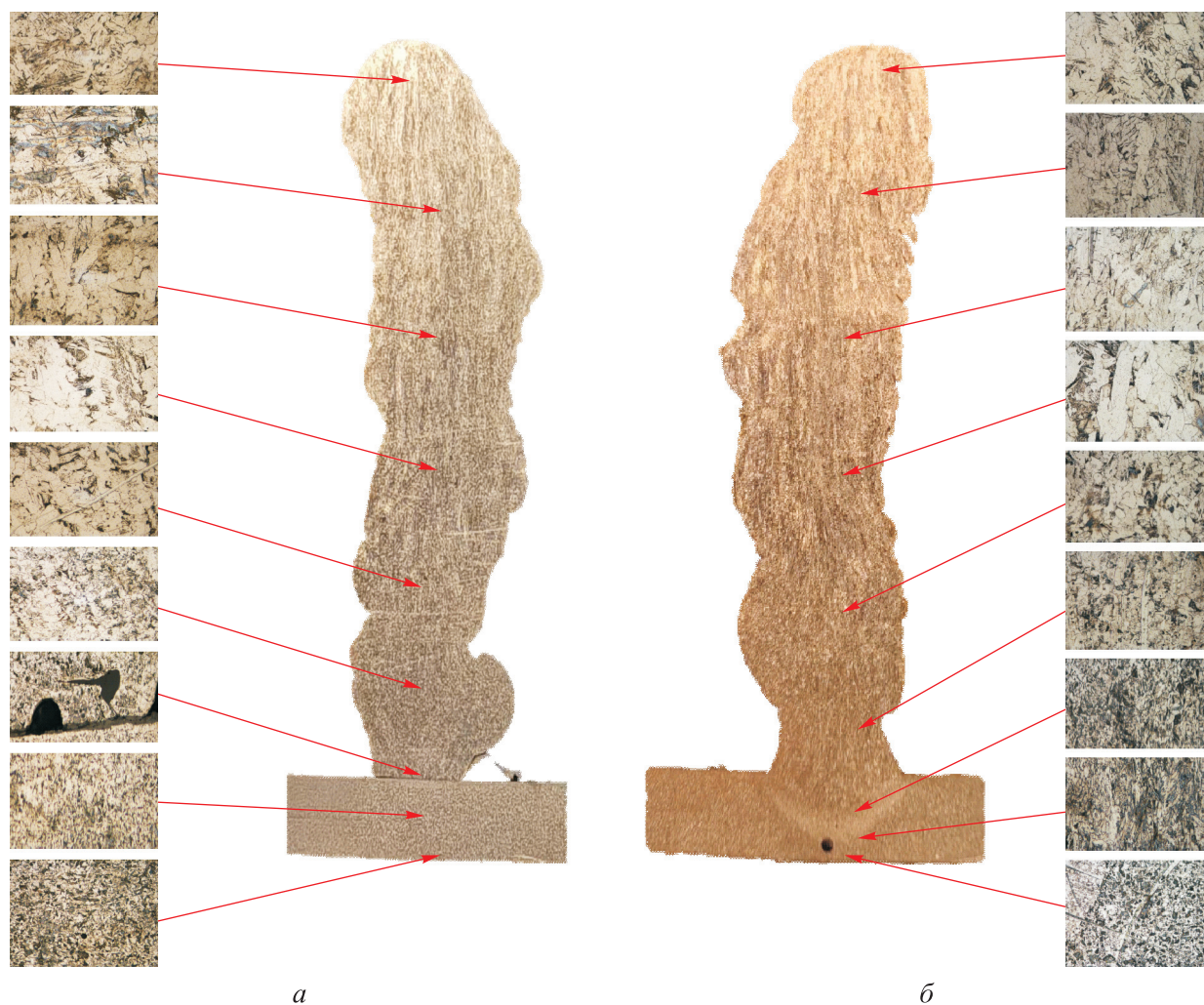


Рис. 6. Макро- и микроструктуры образца плоскокриволинейной формы в точке начала наплавки (а) и на расстоянии 120 мм от нее (б) при увеличении $\times 400$

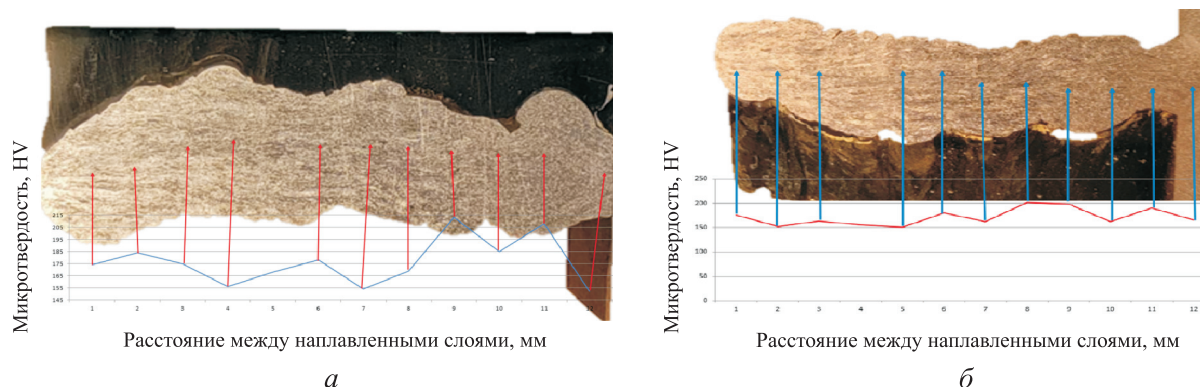


Рис. 7. Распределение микротвердости в поперечном сечении образца плоскокриволинейной формы в точке начала наплавки (а) и на расстоянии 120 мм от нее (б)

зации и перекристаллизации в твердом состоянии, в то время как однородная ферритно-перлитная структура без признаков видманштетта появляется после полного растворения карбидов в аустените при нагреве и последующем медленном охлаждении.

От центральной части в направлении последних проходов имеются отдельные участки с игольчатой структурой. Появление игольчатых участков в структуре стали обусловлено циклическим процессом перегрева и остывания. Этот процесс приводит к формированию видманштеттовой структуры, которая характеризуется геометрически правильным размещением элементов в виде пластин, полигонов и игл внутри кристаллических зерен сплава. В последующих слоях наблюдаются ферритные зерна неправильной оскольчатой формы, а также видманштеттова структура с тонкими иглами, отходящими от ферритной сетки и расположенными внутри зерен.

Анализ структуры образца плоскокриволинейной формы, показанной на рис. 6, б, выявил, что на линии сплавления присутствует равномерно или относительно равномерно распределенный зернистый перлит с мелкоглобулярным размером. На торце подложки наблюдается увеличение зерна, что доказывает наличие термического воздействия.

На первом участке наплавленного валика обнаружены относительно равномерно распределенные более крупные участки перлита в результате медленного остывания.

В следующем слое обнаружены более крупные участки сорбитообразного перлита в результате нормализации.

В центральной части образца наблюдается одна или несколько разорванных полос перли-

та, также прослеживается быстрая кристаллизация наплавленного металла.

В последующих слоях имеются равномерно распределенные небольшие участки тонкопластинчатого перлита, а также относительно равномерно распределенные более крупные участки перлита.

Распределение микротвердости в поперечном сечении образца плоскокриволинейной формы в точке начала наплавки и на расстоянии 120 мм от нее показано на рис. 7, а и б. Видно, что микротвердость увеличивается от верхних слоев к нижним, что можно объяснить изменением времени термического воздействия на разные слои наплавки.

Выводы

1. Анализ результатов исследования показал, что траектория выполнения ДАН напрямую влияет на время термического воздействия на предыдущий слой наплавки, и соответственно, на изменение структуры металла. Выявлено, что при изготовлении образцов с использованием аддитивной наплавки необходимо учитывать зону термического влияния, а также изменение структуры металла.

2. Выявлена возможность получения изделий сложной геометрической формы с помощью ДАН.

3. Показано, что по всему сечению образцов микроструктура материала различна: преобладает ферритно-перлитная смесь с увеличением размера зерен от нижних слоев к верхним. На верхних и боковых поверхностях присутствует видманштеттова структура из-за более быстрого остывания (вследствие переохлаждения редуктора подачи газа). Это приводит к упрочне-

нию и повышению хрупкости образцов от нижнего слоя к верхнему.

4. По результатам измерения твердости установлено, что имеются внутренние напряжения вследствие быстрой кристаллизации. Наименьший показатель микротвердости соответствует точке начала наплавки из-за отсутствия термической обработки. Среднее значе-

ние микротвердости составило 174 HV, что является допустимым без отклонений. Для исключения образования видманштеттовой структуры и равномерного распределения твердости по сечению изделия необходим предварительный и сопутствующий подогрев в процессе наплавки.

Литература

- [1] Мойсеев С.С., Хабибов М.М., Бахматов П.В. Получение заготовок с использованием аддитивных технологий. Дуговая наплавка. *Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Мат. IV Всерос. нац. науч. конф.* Ч. 1. Комсомольск-на-Амуре, КнАГУ, 2021, с. 112–115, doi: <https://doi.org/10.17084/978-5-7765-1474-6-2021-112>
- [2] Доц М.В., Головачев А.М. Разработка рабочей программы дисциплины «Аддитивные технологии» для бакалавров профиля «Технология машиностроения». *Инновации в машиностроении. Мат. док. XIII Межд. науч.-практ. конф.* Барнаул, АлтГТУ, 2022, с. 341–343.
- [3] Голубев И.Г., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С. и др. Перспективные направления использования аддитивных технологий в ремонтном производстве. *Техника и оборудование для села*, 2023, № 6, с. 35–38, doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-6-35-38>
- [4] Залесский В.Г., Поболь И.Л., Бакиновский А.А. и др. Получение металлических изделий с применением электронно-лучевых аддитивных технологий. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*, 2018, т. 63, № 2, с. 169–180, doi: <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-169-180>
- [5] Рожков К.А., Старков И.Н., Лялин А.Н. и др. Аддитивная технология послойного выращивания изделий из жаропрочной стали с помощью электронного луча. *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Мат. Третьей межд. конф.* Москва, МЭИ, 2020, с. 387–393.
- [6] Madiyarova A., Chazhabayeva M., Bukayeva A. et al. Analysis of technological processes laser surfacing in additive manufacturing. *Вестник КазАТК*, 2022, № 4, с. 172–182, doi: <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2022-123-4-172-182>
- [7] Радченко М.В., Радченко Т.Б., Шевцов Ю.О. и др. Аддитивные технологии наплавки. Состояние и перспективы развития. *Сварка и диагностика*, 2017, № 4, с. 38–42. EDN: ZDVHKN
- [8] Какорин Д.Д., Лаврентьев А.Ю. Способы послойного синтеза металлических изделий. *Вестник ТвГТУ. Сер. Технические науки*, 2021, № 3, с. 24–33, doi: <https://doi.org/10.46573/2658-5030-2021-24-33>
- [9] Кулик В.И., Нилов А.С. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники. Санкт-Петербург, БГТУ, 2018. 160 с.
- [10] Тищенко А.Н., Гречухин А.Н. Плазменно-дуговая наплавка. Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых. *Сб. науч. ст. 2-й Всерос науч. конф. перспективных разработок.* Т. 5. Курск, ЮЗГУ, 2021, с. 144–147.
- [11] Лузанов О.Р., Афанасова Т.О., Кириллов В.И. и др. Режимы передачи WAAM. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Сб. мат. IX Межд. науч.-практ. конф.* Т. 1. Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2023, с. 436–439.
- [12] Яковлев А.В., Лебедев Г.С., Лузанов О.Р. Перспективы и технология развития WAAM. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Сб. мат. VIII межд. науч.-практ. конф.* Т. 1. Красноярск, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2022, с. 560–563.
- [13] Верещагина А.С., Кравченко Е.Г. Аддитивные технологии в машиностроении. Комсомольск-на-Амуре, КнАГТУ, 2018. 140 с.
- [14] Комарова К.К., Бахматов П.В. Аддитивная наплавка. Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению. *Мат. Межд. науч.-практ. конф.* Комсомольск-на-Амуре, КнАГТУ, 2022, с. 375–378, doi: <https://doi.org/10.17084/978-5-7765-1502-6-2022-375>

- [15] Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. *Аддитивные технологии в машиностроении*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического ун-та, 2013. 221 с.
- [16] Бахматов П.В., ред. *Разработка алгоритма и исследование процесса программируемого управления формированием сварочно-наплавочного валика, в том числе и в применении аддитивных технологий, на установке автоматической сварки в защитных газах*. Комсомольск-на-Амуре, КнАГУ, 2024. 185 с.

References

- [1] Moiseev S.S., Khabibov M.M., Bakhmatov P.V. [Obtaining blanks using additive technologies. Arc surface]. *Molodezh i nauka: aktualnye problemy fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy. Mat. IV Vseros. nats. nauch. konf.* Ch. 1 [Youth and Science: Current Problems of Fundamental and Applied Research. Proc. IV Russ. National Sci. Conf. P. 1]. Komsomolsk-na-Amure, KnAGU Publ., 2021, pp. 112–115, doi: <https://doi.org/10.17084/978-5-7765-1474-6-2021-112> (in Russ.).
- [2] Dots M.V., Golovachev A.M. [Development of a work program on the discipline "additive technologies" for bachelor graduates of the profile "mechanical engineering technology"]. *Innovatsii v mashinostroyeni. Mat. dok. XIII Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Innovations in Machine Building. Proc. XIII Int. Conf.]. Barnaul, AltGTU Publ., 2022, pp. 341–343. (In Russ.).
- [3] Golubev I.G., Apatenko A.S., Sevryugina N.S. et al. Promising paths for the use of additive technologies in the repair industry. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* [Machinery and Equipment for Rural Area], 2023, no. 6, pp. 35–38, doi: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-6-35-38> (in Russ.).
- [4] Zalesskiy V.G., Pobol I.L., Bakinovskiy A.A. et al. Metal parts manufacturing by electron beam additive technologies. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series], 2018, vol. 63, no. 2, pp. 169–180, doi: <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-169-180> (in Russ.).
- [5] Rozhkov K.A., Starkov I.N., Lyalin A.N. et al. [Additive technology of layer-by-layer growth of heat-resistant steel products using electron beam]. *Elektronno-luchevaya svarka i smezhnye tekhnologii. Mat. Tretyey mezhd. konf.* [Electron Beam Welding and Related Technologies. Proc. 3rd Int. Conf.]. Moscow, MEI Publ., 2020, pp. 387–393. (In Russ.).
- [6] Madiyarova A., Chazhabayeva M., Bukayeva A. et al. Analysis of technological processes laser surfacing in additive manufacturing. *Vestnik KazATK* [Bulletin of KazATC], 2022, no. 4, pp. 172–182, doi: <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2022-123-4-172-182> (in Russ.).
- [7] Radchenko M.V., Radchenko T.B., Shevtsov Yu.O. et al. Additive surfacing technologies. Status and prospects of development. *Svarka i diagnostika* [Welding and Diagnostics], 2017, no. 4, pp. 38–42. EDN: ZDVHKN (in Russ.).
- [8] Kakorin D.D., Lavrentyev A.Yu. Methods of layer-by-layer synthesis of metal products. *Vestnik TvGTU. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Tver State Technical University. Ser. Technical Science], 2021, no. 3, pp. 24–33, doi: <https://doi.org/10.46573/2658-5030-2021-24-33> (in Russ.).
- [9] Kulik V.I., Nilov A.S. *Additivnye tekhnologii v proizvodstve izdeliy aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhniki* [Additive technologies in the production of aviation and rocket-space engineering products]. Sankt-Petersburg, BGTU Publ., 2018. 160 p. (In Russ.).
- [10] Tishchenko A.N., Grechukhin A.N. [Plasma-arc cladding] *Innovatsionnyy potentsial razvitiya obshchestva: vzglyad molodykh uchenykh. Sb. nauch. st. 2-y Vseros nauch. konf. perspektivnykh razrabotok. T. 5* [Innovative Potential of Society Development: a View of Young Scientists. Proc. 2nd Russ. Sci. Conf. of Perspective Developments. Vol. 5]. Kursk, YuZGU Publ., 2021, pp. 144–147. (In Russ.).
- [11] Luzanov O.R., Afanasova T.O., Kirillov V.I. et al. [WAAM transmission modes]. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики. Sb. mat. IX Mezhd. nauch.-prakt. konf. T. 1* [Actual Problems of Aviation and Cosmonautics. Proc. IX Int. Sci.-Pract. Conf. Vol. 1]. Krasnoyarsk, SibGU im. M.F. Reshetneva Publ., 2023, pp. 436–439. (In Russ.).

- [12] Yakovlev A.V., Lebedev G.S., Luzanov O.R. [Perspective and technology of WAAM development]. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики. Sb. mat. VIII mezhd. nauch.-prakt. konf.* T. 1 [Actual Problems of Aviation and Cosmonautics. Proc. VIII Int. Sci.-Pract. Conf. Vol. 1]. Krasnoyarsk, SibGU im. M.F. Reshetneva Publ., 2022, pp. 560–563. (In Russ.).
- [13] Vereshchagina A.S., Kravchenko E.G. Additivnye tekhnologii v mashinostroenii. Komsomolsk-na-Amure, KnAGTU, 2018. 140 p. (In Russ.).
- [14] Komarova K.K., Bakhmatov P.V. [Additive surface]. *Nauka, innovatsii i tekhnologii: ot idey k vnedreniyu. Mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [Science, Innovations and Technologies: from Ideas to Implementation. Proc. Sci.-Pract. Conf.]. Komsomolsk-na-Amure, KnAGTU Publ., 2022, pp. 375–378, doi: <https://doi.org/10.17084/978-5-7765-1502-6-2022-375> (in Russ.).
- [15] Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylyna I.N. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in mechanical engineering]. Sankt-Petersburg, Izd-vo Politekhnikheskogo un-ta Publ., 2013. 221 p. (In Russ.).
- [16] Bakhmatov P.V., ed. *Razrabotka algoritma i issledovanie protsessa programmirovannogo upravleniya formirovaniem svarочно-naplavochnogo valika, v tom chisle i v primenenii additivnykh tekhnologiy, na ustanovke avtomaticheskoy svarki v zashchitnykh gazakh* [Development of algorithm and research of the process of programmable control of welding-fusion roll formation, including in the application of additive technologies, on the automatic welding unit in shielded gases]. Komsomolsk-na-Amure, KnAGU Publ., 2024. 185 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 26.07.2024

Информация об авторах

ГРИГОРЬЕВ Владимир Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева». Косомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Косомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: grigorev.vlv@gmail.com).

ПЛЕТНЕВ Никита Олегович — старший преподаватель кафедры «Технология сварочного и металлургического производства имени В.И. Муравьева». Косомольский-на-Амуре государственный университет (681013, Косомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 27, e-mail: nik1111ta@mail.ru).

ШАНИН Рустам Сергеевич — инженер-конструктор отдела главного конструктора филиала ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация» — Косомольский-на-Амуре авиационный завод имени Ю.А. Гагарина (681018, Косомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Советская, д. 1, e-mail: saninrustam521@gmail.com).

Information about the authors

GRIGOREV Vladimir Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department Technology of welding and metallurgical production named after V.I. Muravyov. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: grigorev.vlv@gmail.com).

PLETNEV Nikita Olegovich — Senior Lecturer, Department Technology of welding and metallurgical production named after V.I. Muravyov. Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 27, e-mail: nik1111ta@mail.ru).

SHANIN Rustam Sergeevich — Design Engineer, Department of the chief Designer of the branch of PJSC United Aircraft Corporation — Komsomolsk-on-Amur Aviation Plant named after Yu.A. Gagarin (681018, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, Sovetskaya St., Bldg. 1, e-mail: saninrustam521@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Григорьев В.В., Плетнев Н.О., Шанин Р.С. Разработка и исследование технологии изготовления металлических конструкций с использованием аддитивной наплавки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 4, с. 41–49.

Please cite this article in English as:

Grigorev V.V., Pletnev N.O., Shanin R.S. Design, development and study of a technology for manufacturing metal structures using the additive surfacing. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 4, pp. 41–49.