

УДК 621.791.927.5

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_04_XX

END: HLMCBP

Применение технологии прямого дугового выращивания для изготовления узла крепления дуговой горелки к фланцу робота-манипулятора

Н.Д. Роцин, К.С. Насоновский, Д.В. Волосевич, Р.С. Корсмик

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Аддитивное производство (Additive Manufacturing) включает в себя технологии создания трехмерных объектов путем послойного нанесения присадочного материала. Существует множество технологий аддитивного производства, которые отличаются между собой расходными материалами, скоростью получения изделий, качеством поверхности получаемого образца, энергетическим источником и т. д. Одной из таких является технология прямого дугового выращивания. Прямое дуговое выращивание — это технология аддитивного производства, в которой в качестве источника тепла для плавления присадочного материала используется энергия электрической дуги. За счет высокой производительности и большой номенклатуры материалов она широко используется в современном машиностроении. Ее применение особенно востребовано в машиностроении для создания специализированной оснастки и компонентов сложной формы, где традиционные методы оказываются недостаточно эффективными.

Цель — разработка, изготовление и испытание узла крепления ручной дуговой горелки к фланцу промышленного робота-манипулятора с использованием технологии прямого дугового выращивания.

Материалы и методы. В работе использовалась сварочная проволока из сплава АМг5 и защитный газ — аргон высокой чистоты. Процесс выращивания осуществлялся на технологическом комплексе на базе робота-манипулятора Fanuc M-710iC и сварочного источника Fronius TPS500i с функцией холодного переноса металла. Были проведены эксперименты по подбору режимов выращивания и стратегий выращивания для обеспечения высокого качества заготовки и минимизации дефектов. Выращенные образцы прошли металлографические и механические испытания.

Результаты. Подобран диапазон стабильных режимов выращивания. Выбранная стратегия выращивания позволила снизить анизотропию и избежать несплавов. Механические испытания показали, что характеристики наплавленного материала превосходят требования ГОСТ 17232-99. На основе проведенных исследований спроектирован, выращен и собран узел крепления, удовлетворяющий заданным критериям жесткости и габаритов.

Выводы. Продемонстрирована эффективность применения технологии прямого дугового выращивания для изготовления узла крепления дуговой горелки к фланцу робота-манипулятора. Разработанная

методика позволяет создавать сложноконтурные изделия с требуемыми механическими свойствами, что подтверждает перспективность использования технологии прямого дугового выращивания в машиностроении.

Ключевые слова: аддитивное производство; прямое дуговое выращивание; узел крепления; холодный перенос металла; оснастка; робот-манипулятор; АМг5.

Как цитировать:

Рощин Н.Д., Насоновский К.С., Волосевич Д.В., Корсмик Р.С. Применение технологии прямого дугового выращивания для изготовления узла крепления дуговой горелки к фланцу робота-манипулятора // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 4. С. XX–XX. DOI: 10.52899/24141437_2025_04_XX EDN: HLMCBP

Рукопись получена: 20.06.2025

Рукопись одобрена: 09.09.2025

Опубликована online: 06.10.2025

The use of direct arc growing technology for the manufacture of an arc torch attachment unit to the flange of a robotic arm

Nikita D. Roschin, Konstantin S. Nasonovsky, Daria V. Volosevich, Rudolf S. Korsmik
Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. Additive Manufacturing includes technologies for creating three-dimensional objects by applying additive materials in layers. There are many additive manufacturing technologies that differ in consumables, the rate of production of products, the surface quality of the resulting sample, the energy source, etc. One of these is the technology of direct arc cultivation. Direct arc cultivation is an additive manufacturing technology in which the energy of an electric arc is used as a heat source for melting the filler material. Due to its high productivity and wide range of materials, it is widely used in modern mechanical engineering. Its use is particularly in demand in mechanical engineering for the creation of specialized tooling and components of complex shapes, where traditional methods are not effective enough.

The aim is to develop, manufacture and test the attachment unit of a manual arc torch to the flange of an industrial robot manipulator using direct arc growing technology.

Materials and methods. Welding wire made of АМг5 alloy and high purity argon protective gas were used in the work. The growing process was carried out on a technological complex based on the Fanuc M-710iC robotic arm and the Fronius TPS500i welding source with the function of cold metal transfer. Experiments were conducted on the selection of growing modes and growing strategies to ensure high quality of the harvest and

minimize defects. The grown samples passed metallographic and mechanical tests.

Results. A range of stable growing modes has been selected. The chosen growing strategy made it possible to reduce anisotropy and avoid non-melting. Mechanical tests have shown that the characteristics of the deposited material exceed the requirements of GOST 17232-99. Based on the conducted research, an attachment unit was designed, grown and assembled that meets the specified criteria of rigidity and dimensions.

Conclusions. The effectiveness of the use of direct arc growing technology for the manufacture of an arc torch attachment unit to the flange of a robotic arm is demonstrated. The developed technique makes it possible to create complex-contoured products with the required mechanical properties, which confirms the prospects of using direct arc growing technology in mechanical engineering.

Keywords: additive manufacturing; direct arc cultivation; attachment unit; cold metal transfer; tooling; robot arm; AMg5.

To cite this article:

Roschin ND, Nasonovsky KS, Volosevich DV, Korsmik RS. The use of direct arc growing technology for the manufacture of an arc torch attachment unit to the flange of a robotic arm. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(4):XX–XX. DOI: 10.52899/24141437_2025_04_XX EDN: HLMCBP

Submitted: 20.06.2025

Accepted: 09.09.2025

Published online: 06.10.2025

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивное производство — это технология, позволяющая создавать объекты сложной формы путем последовательного нанесения слоев материала [1–3]. Одним из перспективных направлений в данной области является прямое дуговое выращивание (ПДВ). ПДВ — это технология аддитивного производства, в которой в качестве источника энергии для плавления присадочного материала используется электрическая дуга [4]. В качестве присадки, как правило, используется сварочная проволока различного сечения и диаметра, за счет чего достигается высокий коэффициент использования материала. Также важным преимуществом данной технологии является высокая производительность процесса и низкая стоимость проволоочных материалов [5]. За счет применения бионического дизайна и топологической оптимизации происходит уменьшение массы заготовки, что в последующем может привести к улучшению эксплуатационных свойств изделия. Поэтому внедрение технологии ПДВ в производственный цикл изделий может существенно снизить материальные и временные затраты [6]. Например, авиакомпания S7 Airlines давно использует проволоочно-дуговое аддитивное производство (WAAM) в создании крупногабаритных изделий для аэрокосмической

отрасли. В их работе представлена часть днища топливного бака диаметром 850 мм, выращенная из алюминиевого сплава [7]. Кроме того, с целью получения эффективного метода производства было проведено сравнение между разными технологиями изготовления кольца днища бака. Сравнивалось фрезерование и технология ПДВ. Результаты показали, что ПДВ значительно сокращает количество отходов, что значительно увеличивает коэффициент использования материала. Таким образом, можно сделать вывод, что технология ПДВ имеет больше преимуществ по сравнению с традиционными методами производства.

Другой компанией, развивающей технологию ПДВ, является «Relativity Space». Их основной сферой деятельности направлена на популяризацию коммерческих полетов в космос [8]. Для этого на своих производственных мощностях спроектированы и произведены собственные ракеты-носители, часть компонентов которых изготовлена из алюминиевых сплавов с применением технологии ПДВ. В марте 2023 г. произведен первый запуск носителя «Terran-1». В ходе полета была преодолена линия Кармана (100 км над уровнем моря), что сделало «Terran-1» первой ракетой, изготовленной с помощью аддитивных технологий и достигшей космоса. Другим примером, использующим технологию ПДВ, является компания MetalWorm [9] — ведущий производитель, специализирующийся на изготовлении сосудов под высоким давлением. Производитель вырастил сосуд диаметром 300 мм и высотой 495 мм, в качестве присадочного материала они использовали проволоку ER 5356. Специалисты MetalWorm считают, что внедрение технологии WAAM принесло несколько важных преимуществ в процесс производства сосудов под давлением. Устраняя необходимость в большом количестве инструментов и сводя к минимуму требования к механической обработке, можно значительно сократить сроки производства. Время на выращивание всего сосуда составило 8,5 часов, что позволило оптимизировать сроки проекта. Более того, сокращение отходов материала и эффективность процесса ПДВ привели к существенной экономии затрат. Также активным развитием технологии ПДВ занимается компания MX3D [10]. Данная компания занимается не только разработкой технологии, но также производит свои комплексы для ее реализации. Одним из наиболее популярных проектов компании является мост, изготовленный с помощью технологии ПДВ и установленный на одном из каналов Амстердама. Также специалистами данной компании была изготовлена рама велосипеда из алюминиевого сплава. Таким образом, можно сделать вывод, что в современном машиностроении значительно увеличился спрос на технологию ПДВ, в связи с этим появляется большое количество компаний, производящих оборудование для ее реализации. Как правило, технологические комплексы включают в себя сварочный источник и какую-либо систему перемещения рабочего инструмента и заготовки. В качестве манипулятора могут использоваться порталные системы или различные промышленные роботы в совокупности с позиционерами. Промышленные роботы представляют собой устройства, перемещающиеся по заданной траектории во время производственного процесса. Их прямое назначение заключается в выполнении определенных операций под контролем оператора или без его участия. По назначению промышленных роботов подразделяют на несколько типов: универсальные, выполняющие различные виды операций и специализированные, эти роботы были созданы для

осуществления одного вида деятельности, таких как сборка, резка, сварка и т. д. Принцип работы сварочного робота зависит от типа его конструкции. В основном все указанные механизмы имеют подвижную руку со сварочной горелкой на конце. Для соединения горелки с фланцем робота используют специальную оснастку. Как правило, ее изготавливают из алюминиевых сплавов, чтобы обеспечить всю конструкцию жесткостью и не превысить максимально допустимую нагрузку. Создание оснастки с помощью аддитивных технологий широко распространяется в современном машиностроении.

В рамках настоящей работы была достигнута цель по разработке и изготовлению крепления горелки к фланцу робота с применением технологии ПДВ.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Для выращивания компонентов узла крепления использовалась алюминиевая проволока из сплава АМг5. В качестве подложки использовался лист толщиной 10 мм. Химический состав проволоки приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав проволоки СвАМг5 по ГОСТ 7871-2019 [11]

Table 1. Chemical composition of SwAMg5 wire according to GOST 7871-2019 [11]

Элемент	Al	Mg	Mn	Ti	Be	Fe	Si	Zn	Cu
Содержание, %	ост.	4,8–5,8	0,5–0,8	0,1–0,2	0,002–0,005	<0,4	<0,4	<0,2	<0,05

Для защиты рабочей зоны использовался аргон высокой чистоты (ВЧ) по ГОСТ 10157-2016 [12].

Выращивание отдельных компонентов крепления производилось на макете электродугового выращивания. Внешний вид макета представлен на рис. 1.

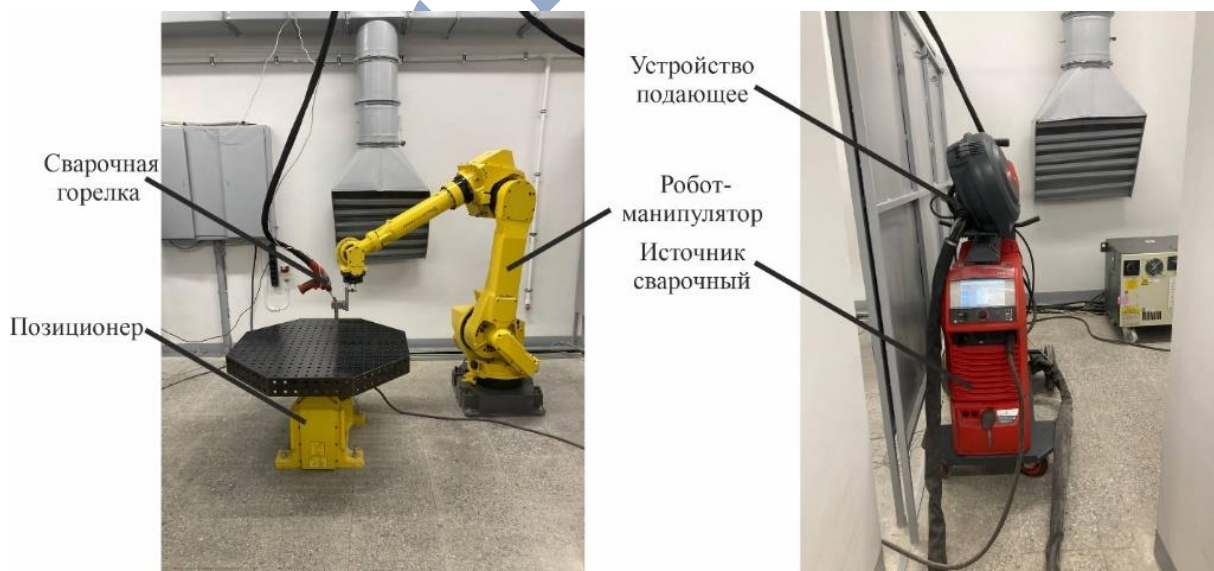


Рис. 1. Внешний вид макета электродугового выращивания.

Fig. 1. External view of the electric arc cultivation layout.

Перечень оборудования, входящего в макет, представлен в табл. 2.

Таблица 2. Перечень оборудования, входящего в макет электродугового выращивания

Table 2. List of equipment included in the model of electric arc cultivation

Обозначение	Наименование
-------------	--------------

Сварочный источник	Fronius TPS500i
Устройство подачи проволоки	Fronius WF 25i
Горелка сварочная	Fronius 400I PM CMT
Чиллер	Fronius CU 1100i
Робот-манипулятор	Fronius M-710iC
Позиционер	Fanuc 2-Axis Positioner
Контроллер	Fanuc R-30iB Plus

В качестве рабочего инструмента использовалась ручная горелка Fronius 400I PM CMT (рис. 2). Данное устройство не предназначено для использования в ПДВ, т. к. оно изготовлено для ручной сварки. Однако из-за отсутствия других альтернатив в виде приобретения роботизированной сварочной горелки появляется необходимость в создании узла крепления для имеющегося оборудования. Вместе с тем сварочная горелка имеет функцию холодного переноса металла Cold Metal Transfer (CMT). Основной принцип данной технологии заключается в принудительном отделении капли за счет возвратно-поступательного движения присадочной проволоки.



Рис. 2. Сварочная горелка Fronius 400I PM CMT.

Fig. 2. Welding torch Fronius 400I PM CMT.

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ

ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ВЫРАЩИВАНИЯ, ПРОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

В ходе исследования процесса ПДВ была установлена область, ограниченная двумя режимами (с низким и высоким тепловложением), обеспечивающими стабильное формирование. Подбор параметров производился путем варьирования сварочного тока, при этом значение скорости перемещения рабочего инструмента не изменялось и равнялось 15 мм/с.

В рамках эксперимента по подбору режима были наплавлены единичные валики длиной 100 мм. В качестве начальной точки было взято значение сварочного тока равное 20 А (рис. 3). Далее данный параметр увеличивался с шагом 20 А. После наплавки производилась визуальная оценка полученных валиков, а также измерение ширины и высоты. Результаты измерений представлены в табл. 3.

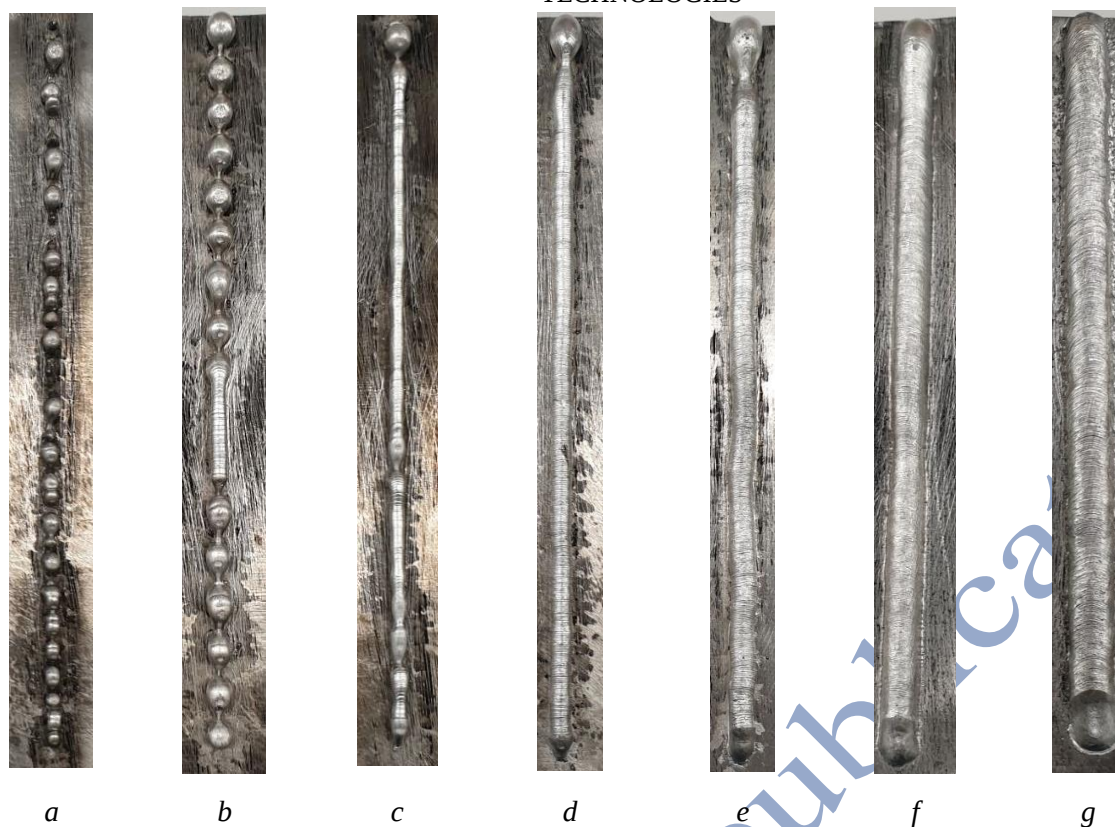


Рис. 3. Единичные валики: а — 20 А; б — 40 А; с — 60 А; д — 80 А; е — 100 А; ф — 120 А; г — 140 А.

Fig. 3. Single rollers: а — 20 А; В — 40 А; с — 60 А; d — 80 А; е — 100 А; f-120 А; g-140 А.

Таблица 3. Результаты измерений единичных валиков

Table 3. Measurement results of single rollers

Сварочный ток, А	Средняя ширина, мм	Средняя высота, мм
20	—	—
40	—	—
60	2,64	1,06
80	3,35	1,27
100	4,12	1,58
120	5,03	1,74
140	5,88	1,87
160	6,1	1,96

Из-за низкого тепловложения валики со значениями сварочного тока 20 и 40 А не имели стабильного формирования.

Далее для подбора режима выращивания были наплавлены стенки длиной 100 мм и высотой 10 слоев. Значение сварочного варьировалось в такой же последовательности, как и для единичных валиков. На основании полученных результатов было установлено, что наилучшее формирование достигается в диапазоне сварочного тока от 60 до 120 А. При больших значениях происходит отекание расплавленного материала, в результате чего на боковой поверхности образца образуются наплывы. При меньших значениях вкладываемого тепла недостаточно для формирования валика. На рис. 4 представлен внешний вид полученных стенок.

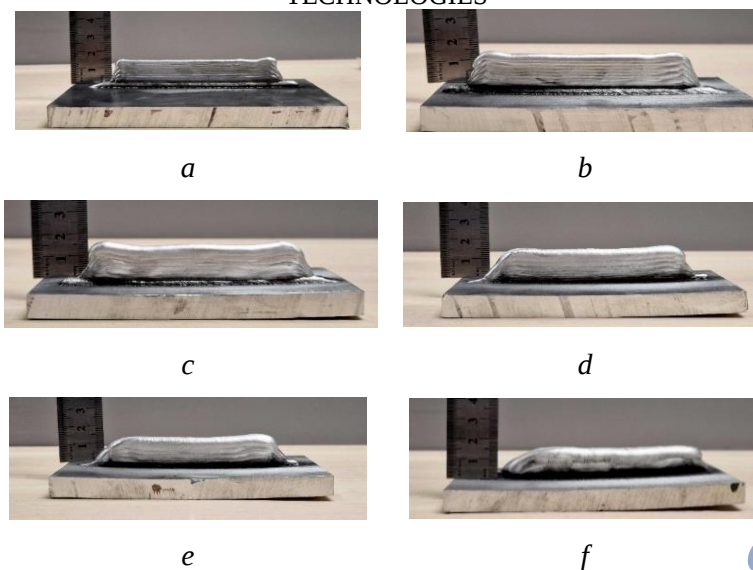


Рис. 4. Внешний вид полученных образцов: *a* — 40 А; *b* — 60 А; *c* — 80 А; *d* — 100 А; *e* — 120 А; *f* — 140 А.

Fig. 4. Appearance of the obtained samples: *A* — 40 A; *B* — 60 A; *c* — 80 A; *d* — 100 A; *e* — 120 A; *F* — 140 A.

Для выращивания крупногабаритных изделий важно соблюдать рабочий режим с большим тепловложением для поддержания необходимой межпроходной температуры. Данного результата можно добиться путем повышения сварочного тока до 120 А. Выращивание производилось с несколькими валиками в слое с коэффициентом перекрытия 35%. В результате экспериментальной работы удалось добиться стабильного формирования с высоким качеством боковой поверхности. Внешний вид полученного образца представлен на рис. 5.

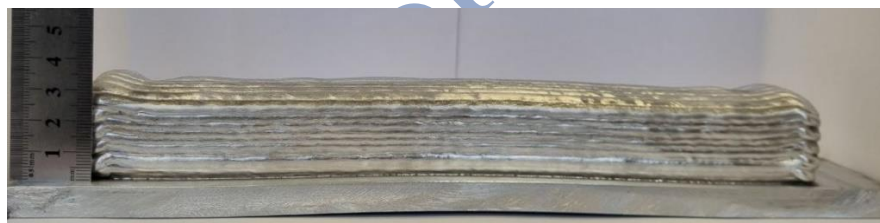


Рис. 5. Внешний вид полученного образца.

Fig. 5. The appearance of the obtained sample.

На полученных образцах проводились металлографические испытания, в ходе которых была исследована их макроструктура (рис. 6). На приведенном изображении видно, что подобранные режимы наплавки позволяют получать практически бездефектную структуру. В обоих образцах пористость не превышала 0,5% площади сечения.

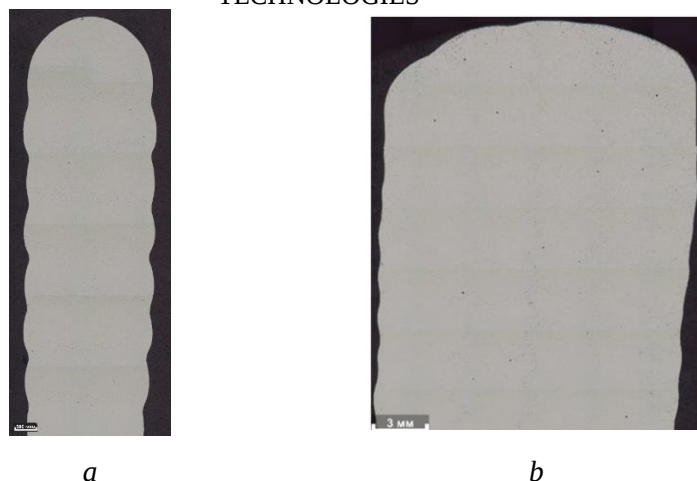


Рис. 6. Макроструктура полученных образцов: а — режим $I=100$ А, $V=15$ мм/с; б — режим $I=120$ А, $V=15$ мм/с.
Fig. 6. Macrostructure of the obtained samples: а — mode $i=100$ a, $V=15$ mm/s; б — mode $I=120$ a, $V=15$ mm/s.

ВЫБОР СТРАТЕГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Для предотвращения возможного возникновения анизотропии использовалась специальная стратегия выращивания (рис. 7).

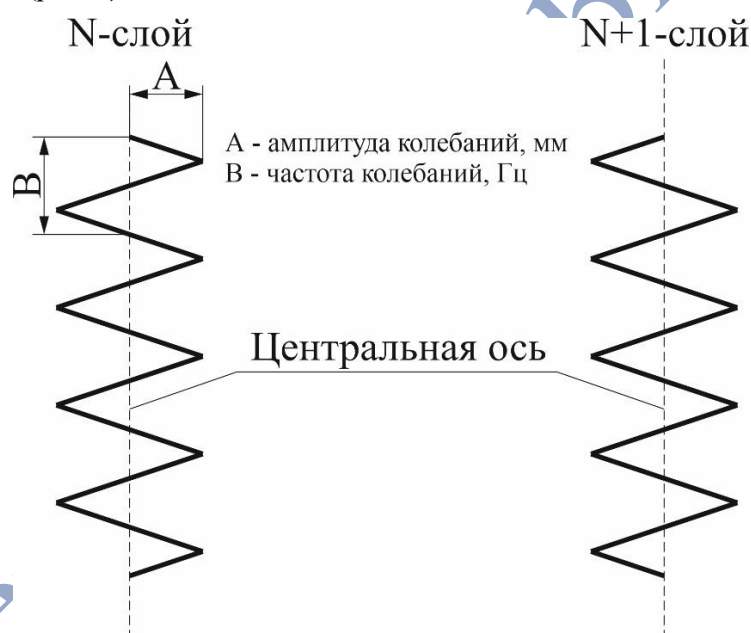


Рис. 7. Стратегия выращивания.
Fig. 7. Growing strategy.

Стратегия заключается в использовании функции Wave, ее суть отражается в следующем: при перемещении рабочего инструмента по заданной траектории происходят волновые движения с определенной амплитудой и частотой колебаний. При подборе этих параметров возникали дефекты в виде несплавов (рис. 8).



Рис. 8. Дефекты, возникшие при подборе параметров функции Wave.

Fig. 8. Defects that occur when selecting the parameters of the Wave function.

Данная проблема решается за счет понижения значения частоты колебаний и увеличения сварочного тока. Подобранные значения амплитуды и частоты составляли 13 мм и 2 Гц соответственно.

С помощью данной стратегии были выращены образцы для механических испытаний (рис. 9).

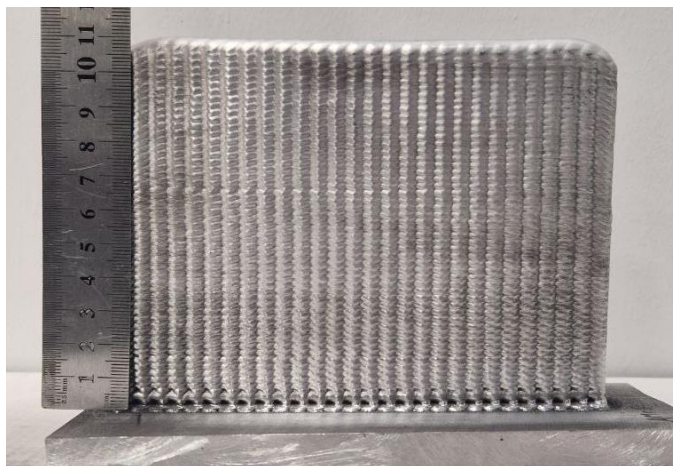


Рис. 9. Образец для механических испытаний.

Fig. 9. A sample for mechanical testing.

На основании полученных результатов было установлено, что значение предела текучести и временного сопротивления в направлении оси Z ниже стандартного для проката, представленного в ГОСТ 17232-99 [13]. В направлении оси X значения механических свойств превосходят те, что представлены в стандарте.

Такое поведение материала связано с образованием анизотропной структуры, типичной для процесса WAAM. Неоднородности связаны с разным размером зерен и образованием столбчатых структур на границе валика, что приводит к снижению прочностных свойств. Также в образцах наблюдается фазовая неоднородность: границы валика по сравнению с серединой обогащены крупными игольчатыми интерметаллидами. Результаты механических испытаний представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты механических испытаний

Table 4. Results of mechanical tests

Направление	Предел текучести, $\sigma_{0.2}$, МПа	Временное сопротивление, σ_b , МПа	Отн. удлинение, δ_5 , %
X	132	268	34,3
Z	107	254	16,5
ГОСТ 17232-99	120	265	13

Все элементы крепления выращивались с использованием функции Wave, кроме элемента «кронштейн» (рис. 10).

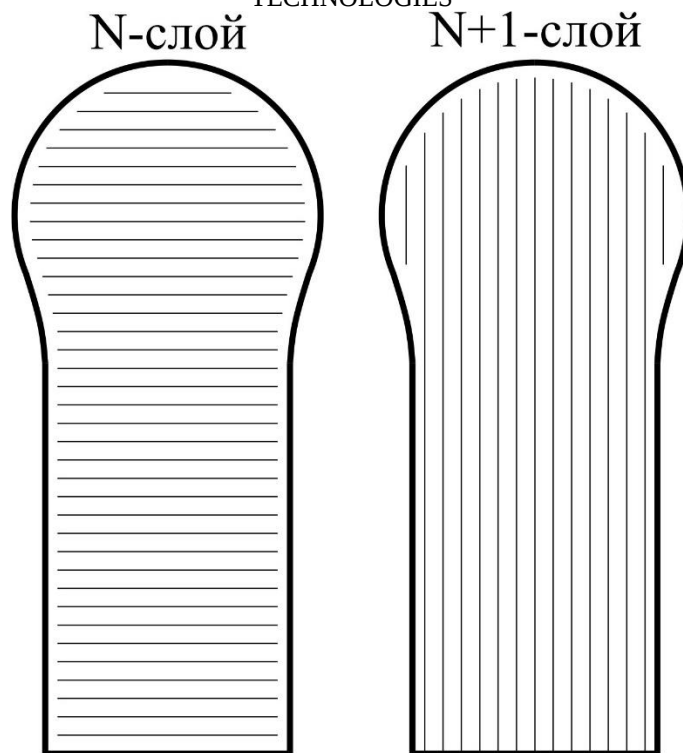


Рис. 10. Стратегия выращивания кронштейна.

Fig. 10. The strategy of growing the bracket.

Такой выбор обусловлен ограничением амплитуды робота при включенной функции Wave, равной 15 мм. В нашем случае ширина изготавливаемого элемента превышает данное значение. Перед его изготовлением было проработано смещение между оконтуривающим и заполняющими валиками. Это связано с тем, что при стандартном смещении в половину ширины единичного валика, значение которого для тока 100 А равняется 2,1 мм, появляются дефекты в виде несплавлений (рис. 11). Следует отметить, что данный дефект появлялся только в месте начала наплавки.



Рис. 11. Дефекты при выращивании кронштейна.

Fig. 11. Defects during the extension of the bracket.

Для решения данной проблемы было подобрано новое смещение, которое составляло 25% от ширины единичного валика и равнялось 1 мм. После изменения данного параметра дефектов не наблюдалось.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРЕПЛЕНИЯ

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ УСТАНОВКИ КРИТЕРИЕВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСНАСТКИ

Создание крепления осуществлялось с учетом специфической формы сварочной горелки и фланца робота и их взаиморасположения. Первоначальным этапом проектирования узла крепления было измерение сварочной горелки и фланца робота.

Строение робота Fanuc 710ic/50 не подразумевает присоединение стандартной сварочной роботизированной горелки из-за отсутствия пустотелого фланца. Спроектированное крепление должно: учитывать массовые характеристики сварочной горелки, быть достаточной высоты для исключения перегиба шланг-пакета в согнутом положении, иметь длину не менее 150 мм, чтобы исключить трение шланг-пакета о фланец робота во время работы. Также необходимо добавить в конструкцию датчик столкновений, который обеспечивает безопасное движение рабочего инструмента.

Основываясь на установленных критериях, было принято решение, что для узла крепления необходимы:

- длина от оси фланца робота не менее 150 мм;
- высота от фланца робота не менее 170 мм;
- легковесные сплавы с высокими прочностными характеристиками.

После учета всех критериев был разработан следующий узел крепления, трехмерная модель

которого представлена на рис. 12.

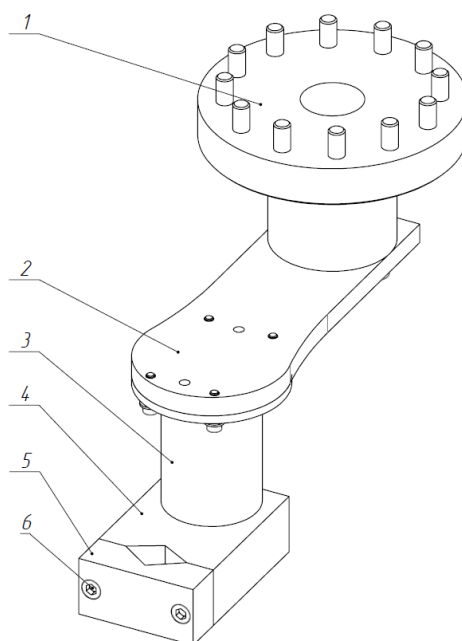


Рис. 12. Схема узла крепления с проставленными позициями.

Fig. 12. Diagram of the mounting unit with the positions indicated.

Компоненты крепления указаны в табл. 5.

Таблица 5. Компоненты крепления

Table 5. Mounting components

Позиция	Наименование
1	Фланец переходной
2	Кронштейн
3	Датчик столкновений
4	Пластина
5	Пластина прижимная
6	Крепежные изделия

Переходной фланец выполняет функцию соединения всего узла крепления с роботом. Кронштейн обеспечивает выполнение критериев по длине, а также соединяет датчик столкновений с пластиной. Пластина предназначена для установки сварочной горелки. Жесткость соединения обеспечивается с помощью прижимной пластины.

Для проверки жесткости кронштейна была применена функция SOLIDWORKS Simulation в системе SolidWorks, которая позволяет проверить отклонение геометрии при воздействии внешних сил, анализ показал, что нагрузка в 7 кг, которая равна весу сварочной горелки, вызывает максимальное отклонение для данного материала и конфигурации в 0,046 мм, что для нас является значительно несущественным и соответствует установленным критериям (рис. 13).

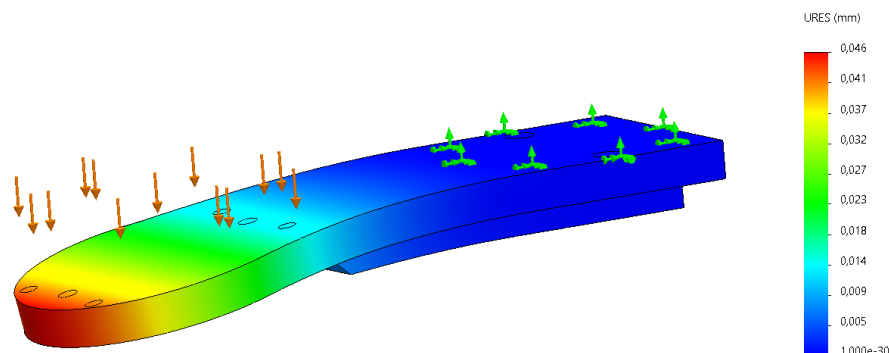


Рис. 13. Проверка жесткости кронштейна.

Fig. 13. Checking the rigidity of the bracket.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ

ВЫРАЩИВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПЛЕНИЯ

После этапа проектирования производилось выращивание всех компонентов крепления. Выращивание переходного фланца происходило в два этапа: 1-й этап заключался в наплавке большого цилиндра, на 2-м этапе происходило выращивание малого цилиндра. Значение сварочного тока равнялось 100 А, скорость перемещения рабочего инструмента 15 мм/с. На рис. 14 представлено изображение выращенного фланца.



a



b

Рис. 14. Выращенный фланец: а — выращивание большого цилиндра; b — выращивание малого цилиндра.

Fig. 14. Protruding flange: a — protrusion of a large cylinder; b — protrusion of a small cylinder.

Следующим этапом изготовления узла крепления было выращивание кронштейна (рис. 15). Значение сварочного тока на оконтуривающем валике равнялось 120 А, а на заполнении 100 А, скорость перемещения рабочего инструмента не изменялась и равнялась 15 мм/с.



Рис. 15. Выращенный кронштейн.

Fig. 15. The protruding bracket.

Далее выращивались пластины для закрепления сварочной горелки (рис. 16). Значение сварочного тока и скорость перемещения рабочего инструмента были такими же, как и при выращивании переходного фланца.



a



b

Рис. 16. Выращенные пластины: а — пластина; б — пластина прижимная.

Fig. 16. Pronounced plates: a — plate; b — pressure plate.

СБОРКА УЗЛА КРЕПЛЕНИЯ

После изготовления всех элементов узла крепления происходил этап сборки. На рис. 17 представлена полная сборка оснастки.



Рис. 17. Собранный узел крепления.

Fig. 17. The mounting assembly.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результаты применения технологии ПДВ для изготовления узла крепления дуговой горелки к фланцу робота.

В ходе настоящего исследования были решены следующие задачи:

- 1) проведен анализ литературных источников;
- 2) подобраны параметры режима наплавки и проведены металлографические испытания, обеспечивающие высокое качество наплавленного материала;

- 3) подобрана стратегия выращивания и проведены механические испытания;
- 4) проанализированы исходные данные для проектирования оснастки;
- 5) спроектированы компоненты крепления;
- 6) созданы управляющие программы;
- 7) изготовлен и собран узел крепления.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Н.Д. Рощин — написание текста рукописи; К.С. Насоновский — проведение экспериментов по подбору режимов и стратегии выращивания; Д.В. Волосевич — проведение металлографических и механических испытаний; Р.С. Корсмик — экспертная оценка, утверждение финальной версии. Авторы одобрили версию для публикации, а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой ее части.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре.

ADDITIONAL INFO

Authors' contribution: N.D. Roschin: writing the manuscript text; K.S. Nasonovsky: conducting experiments on the selection of deposition modes and growth strategy; D.V. Volosevich: conducting metallographic and mechanical tests; R.S. Korsmik: expert evaluation, approval of the final version. All the authors approved the version of the draft to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: In preparing this work, the authors did not use previously published material (text, illustrations, or data).

Generative AI: Generative AI technologies were not used in the preparation of this article.

Provenance and peer-review: This work was submitted to the journal on the authors' own initiative and processed under the standard procedure.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Armstrong M., Mehrabi H., Naveed N. An overview of modern metal additive manufacturing technology // Journal of Manufacturing Processes. 2022. № 84. P. 1001–1029. doi: 10.1016/j.jmapro.2022.10.060 EDN: CIUFNB
2. Tomar B., Shiva S., Nath T. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances // Materials Today Communications. 2022. № 31. doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739 EDN: AEIKEG
3. Binta Wu, Zengxi Pan, Donghong Ding, et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement // Journal of Manufacturing Processes. 2018. № 35. P. 127–139.
4. Tawfik M.M., Nemat-Alla M.M., Dewidar M.M. Enhancing the properties of aluminum alloys fabricated using wire + arc additive manufacturing technique – A review // Journal of Materials Research and Technology. 2021. № 13. P. 754–768. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.04.076 EDN: VLFQLA
5. Williams S. Large scale metal WAAM additive manufacturing of structural engineering parts. In: 69th IIW Annual Assembly and International Conference. Tokyo, 2016.
6. 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 // Materials & Design. 2021. № 202. doi: 10.1016/j.matdes.2021.109471 EDN: TDFOQI
7. Аддитивные технологии. Журнал об аддитивном производстве. S7 Space: проволочно-дуговая аддитивная технология в современном производстве. Дата обращения: 06.06.2024. Режим доступа: <https://additiv-tech.ru/content/s7-space-provolочно-dugovaya-additivnaya-tehnologiya-v-sovremennom-proizvodstve>
8. Relativity Space. Дата обращения: 06.06.2024. Режим доступа: <https://www.relativityspace.com>
9. Disruptive Production via Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Technology: Printing pressure vessel in a single set-up. Дата обращения: 06.06.2024. Режим доступа: <https://www.metalworm.com/pressure-vessel-fabrication-with-waam-technology/>
10. MX3D. Robotic 3D Metal Printing. Дата обращения: 06.06.2024. Режим доступа: <https://mx3d.com/>
11. ГОСТ 7871-2019. Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 09.10.2019 N 901-ст: дата введения 2020-01-02. М.: Стандартинформ, 2019.
12. ГОСТ 17232-99. Плиты из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия: Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и

метрологии от 18 февраля 2000 г. N 42-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 17232-99 введен в действие с 2000-09-01. М.: Стандартинформ, 1999.

13. ГОСТ 17232-99. Плиты из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия: Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии от 18 февраля 2000 г. N 42-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 17232-99 введен в действие с 2000-09-01. М.: Стандартинформ, 1999.

REFERENCES

1. Armstrong M, Mehrabi H, Naveed N. An overview of modern metal additive manufacturing technology. *J Manuf Process*. 2022;84:1001–1029. doi:10.1016/j.jmapro.2022.10.060 EDN: CIUFNB
2. Tomar B, Shiva S, Nath T. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances. *Mater Today Commun*. 2022;31:103739. doi:10.1016/j.mtcomm.2022.103739 EDN: AEIKEG
3. Wu B, Pan Z, Ding D, et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *J Manuf Process*. 2018;35:127–139.
4. Tawfik MM, Nemat-Alla MM, Dewidar MM. Enhancing the properties of aluminum alloys fabricated using wire + arc additive manufacturing technique – A review. *J Mater Res Technol*. 2021;13:754–768. doi:10.1016/j.jmrt.2021.04.076 EDN: VLFQLA
5. Williams S. Large scale metal WAAM additive manufacturing of structural engineering parts. In: *69th IIW Annual Assembly and International Conference*. Tokyo; 2016.
6. Jafari D, Vaneker THJ, Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Mater Des*. 2021;202:109471. doi:10.1016/j.matdes.2021.109471 EDN: TDFOQI
7. Additivnye Tekhnologii [Additive Technologies Journal]. S7 Space: wire arc additive technology in modern production. Accessed: June 6, 2024. Available from: <https://additiv-tech.ru/content/s7-space-provolочно-dugovaya-additivnaya-tehnologiya-v-sovremennom-proizvodstve>
8. Relativity Space. Accessed: June 6, 2024. Available from: <https://www.relativityspace.com>
9. Disruptive Production via Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Technology: Printing pressure vessel in a single set-up. Accessed: June 6, 2024. Available from: <https://www.metalworm.com/pressure-vessel-fabrication-with-waam-technology/>
10. MX3D. Robotic 3D Metal Printing. Accessed: June 6, 2024. Available from: <https://mx3d.com/>
11. GOST 7871-2019. Welding wire made of aluminum and aluminum alloys. Specifications: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated October 9, 2019 N 901-st: date of introduction 2020-01-02. Moscow: Standartinform; 2019.
12. GOST 17232-99. Plates of aluminum and aluminum alloys. Specifications: By the Decree of the State Committee of the Russian Federation for Standardization and Metrology dated February 18, 2000 N 42-st, the interstate standard GOST 17232-99 was put into effect on 2000-09-01. Moscow: Standartinform;

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ * Рощин Никита Дмитриевич; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; ORCID: 0009-0004-2167-5303; e-mail: n.d.roschin@gmail.com Насоновский Константин Сергеевич; ORCID: 0000-0002-0069-2698; eLibrary SPIN: 3236-9603; e-mail: nasonovskiy.konstantin@gmail.com Волосевич Дарья Владимировна; ORCID: 0000-0002-2288-2935; e-mail: dasha.volosevich@mail.ru Корсмик Рудольф Сергеевич, канд. техн. наук; ORCID: 0000-0003-1591-1942; eLibrary SPIN: 6726-2629; e-mail: rudak27@yandex.ru	* Nikita D. Roschin; address: 3 Lotsmanskaya st., Saint Petersburg, Russia, 190121; ORCID: 0009-0004-2167-5303; e-mail: n.d.roschin@gmail.com Konstantin S. Nasonovsky; ORCID: 0000-0002-0069-2698; eLibrary SPIN: 3236-9603; e-mail: nasonovskiy.konstantin@gmail.com Daria V. Volosevich; ORCID: 0000-0002-2288-2935; e-mail: dasha.volosevich@mail.ru Rudolf S. Korsmik, Cand. Sci. (Engineering); ORCID: 0000-0003-1591-1942; eLibrary SPIN: 6726-2629; e-mail: rudak27@yandex.ru
---	--

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author