

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №5 (167). С.3-14.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №5 (167). P.3-14.

Научная статья
УДК 621.791/621.9
doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-3-14

Влияние технологических факторов на процессы формирования параметров качества изделий, изготавливаемых WAAM-методом на основе дуговой сварки в защитных газах

Шенбо Ли¹, д.т.н.
Чжишу Линь², д.т.н.

Андрей Викторович Киричек³, д.т.н.

Максим Николаевич Нагоркин⁴, д.т.н.

Максим Александрович Новиков⁵, аспирант

^{1,2} Сямьинский технологический университет, Сямьинь, Китай

^{3,4,5} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ hit4057@xmut.edu.cn, <https://orcid.org/0009-0000-6950-0415>

² linzs@xmut.edu.cn, <https://orcid.org/0009-0001-2858-3223>

³ avkbgtu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3823-0501>

⁴ nagorkin_mn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>

⁵ novikovmax14@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7552-312X>

Аннотация. Объектом исследования в статье являются технологические процессы аддитивного производства на основе автоматической дуговой сварки проволочным электродом в среде защитного газа – DED-W/WAAM-GMAW. В статье представлена классификация DED-технологий и их сравнительные характеристики. Указаны преимущества WAAM-процессы на основе GMAW. Перечислены управляющие факторы технологий WAAM-GMA, влияющие на формирование параметров качества изготавливаемых изделий, и выходные параметры процесса, по которым оценивают технологические возможности WAAM-GMAW-процесса. Рассмотрены механизмы переноса металла в процессе его осаждения на формируемую заготовку. Представлены сравнительные характеристики режимов переноса, оценивается их влияние на протекание GMAW-процессов. Рассмотрено влияние на параметры качества изделий и процесс наплавки полярности таких факторов, как полярность подключения проволоки-электрода, сила тока и напряжение источника питания сварочной дуги, скорость подачи проволоки, скорость перемещения сварочной головки (сварочной ванны), состав защитного газа. Рассмотрены аспекты моделирования траекторий формообразующих движений сварочной головки в процессах WAAM-GMAW, влияющих на тепловые процессы наплавки, геометрическую точность и форму изготавливаемой заготовки, механические свойства материала заготовки. Рассмотрены недостатки метода, связанные с возможным возникновением дефектов изделий, таких как высокие шероховатость и волнистость поверхности, анизотропия механических свойств материала, переливы металла на боковой поверхности заготовки, остаточные напряжения, пористость, трещины и расслоение. Перечислены причины возникновения дефектов. Представлен анализ подверженности различных материалов различным дефектам. Представлены сведения о степени влияния некоторых управляющих технологических факторов процессов WAAM-GMAW на параметры процесса наплавки и формируемые параметры качества изделий. Предложен ряд решений, позволяющих повысить надёжность формирования параметров качества изделий, получаемых WAAM-GMAW-методами

Ключевые слова: DED, WAAM, GMAW, аддитивные технологии, электродуговая сварка в защитном газе, многослойная наплавка, режим переноса металла, технологические факторы, параметры качества

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, работа «Проведение фундаментальных научных исследований» в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ по проекту №FZWR-2024-0003 (№ 075-00150-24-03) «Разработка технологической стратегии и теоретико-экспериментальное исследование ключевых элементов технологии аддитивного синтеза из металлической проволоки деталей 3DMP-методом и волнового термомодеформационного упрочнения синтезируемых деталей машин».

Для цитирования: Шенбо Ли, Чжишу Линь, Киричек А.В., Нагоркин М.Н., Новиков М.А. Влияние технологических факторов на процессы формирования параметров качества изделий, изготавливаемых WAAM-методом на основе дуговой сварки в защитных газах // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 5 (167). С. 3–14. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-3-14

Technology factors effect on the quality parameters of products manufactured by the WAAM-technique based on GMAW (gas-metal-arc-welding)

Shengbo Li¹, D. Eng.

Zhishu Lin², D. Eng.

Andrey V. Kirichek³, D. Eng.

Maxim N. Nagorkin⁴, D.Eng.

Maxim A. Novikov⁵, postgraduate student

^{1, 2} Xiamen University of Technology, Xiamen, China

^{3, 4, 5} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ hit4057@xmut.edu.cn

² linzs@xmut.edu.cn

³ avkbgtu@gmail.com

⁴ nagorkin_mn@mail.ru

⁵ novikovmax14@yandex.ru

Abstract. *The object of research in the article is a welding procedure of additive manufacturing based on automatic wire electrode arc welding in a shielding gas environment– DED-W / WAAM-GMAW. The article presents the classification of DED technologies and their comparative characteristics. The advantages of WAAM processes based on GMAW are illustrated. The controlling factors of WAAM-GMA technologies that influence quality parameters of manufactured products and the output parameters of the process are specified for the evaluation of engineering capabilities in WAAM-GMAW. The mechanisms of metal transfer during its deposition onto the formed blank part are viewed. Comparative characteristics of transfer modes are presented, and their effect on the course of GMAW processes is evaluated. The influence of such factors as the polarity of the electrode wire connection, the current strength and voltage of the welding arc power source, the wire feed rate, the speed of movement of the welding blowpipe (welding bath), shielding gas composition on the product quality parameters and WOL is viewed. The aspects of path modeling of the shaping movements of the welding blowpipe in the WAAM-GMAW procedure affecting the thermal processes of WOL, the geometric accuracy and shape of the blank part, and the mechanical properties of the work material are described. The disadvantages of the method related to the possible defects in products, such as high surface roughness and undulation, anisotropy of the mechanical properties of the material, metal overflows on the side surface of the blank, residual stresses, porosity, cracks and delamination, are focused on. The causes of defects are listed. An analysis of the proneness of various materials to various defects is presented. Information is provided on the degree of influence of some of the controlling technology factors of the WAAM-GMAW procedure on the WOL parameters and the generated product quality parameters. A number of solutions have been proposed to improve the reliability of forming the quality parameters for products obtained by WAAM-GMAW methods.*

Keywords: DED, WAAM, GMAW, additive technologies, electric gas-metal-arc-welding, multilayer WOL, metal transfer mode, technology factors, quality parameters

Acknowledgements: the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the work "Conducting fundamental scientific research" within the framework of the basic part of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under project No. FZWR-2024-0003 (No. 075-00150-24-03) "Development of a technological strategy and theoretical and experimental research of key elements of the additive synthesis technology of metal wire for 3DMP parts produced by the method and wave thermal deformation hardening for synthetically produced machine parts".

For citation: Shengbo Li, Zhishu Lin, Kirichek A.V., Nagorkin M.N., Novikov M.A. Technology factors effect on the quality parameters of products manufactured by the WAAM- technique based on GMAW (gas-metal-arc-welding) / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 5 (167). P. 3–14. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-3-14

Введение

Аддитивные технологии (АТ) активно внедряются в производственные процессы производства изделий. Методы послойного нанесения металлов, в частности, электродуговой сваркой в среде защитного газа (WAAM), позволяют производить детали среднего и большого размера с высокой производительностью и сравнительно низкой стоимостью процесса. Для широкого внедрения в производство, как и для других методов АТ, необходимо точно знать возможности технологического метода по обеспечению требуемых параметров качества изделия, с целью обоснования экономической эффективности его применения. Необходимо проводить множество исследований по оценке степени влияния технологических факторов WAAM-технологий на процессы, протекающие при изготовлении изделий и формирование показателей качества. В статье представлен обзор некоторых исследований, связанных с оценкой технологических возможностей WAAM-технологий на основе применения электродуговой сваркой в среде защитного газа.

Классификация аддитивных технологий

Аддитивный технологический процесс – процесс изготовления деталей, основанный на создании физического объекта по электронной геометрической модели путём добавления материала слой за слоем. В соответствии с ГОСТ Р 57558-2017, ГОСТ Р 57589-2017, ГОСТ Р 57588-2021 различают семь категорий процессов, применяемых в аддитивных технологиях и технологическом оборудовании: 1) процесс фотополимеризации в ванне (vat photopolymerization); 2) процесс струйного нанесения материала (MJ – material jetting); 3) процесс струйного нанесения связующего (BJ – binder jetting); 4) процесс синтеза на подложке (PBF – powder bed fusion); 5) процесс экструзии материала (ME – material extrusion); 6) процесс прямого подвода энергии и материала (DED – directed energy deposition); 7) процесс листовой ламинации (SL – sheet lamination).

Для изготовления металлических изделий применяют процессы BJ, PBF, DED, SL.

DED-процессы направленного нанесения (осаждения) металлического материала под воздействием тепловой энергии от внешнего

источника обладают такими преимуществами, как высокая производительность, возможность изготовления изделий сложных геометрических форм (в том числе крупногабаритных) с заданными механическими свойствами, разнообразие применяемых материалов и др. [1 – 4].

В зависимости от вида применяемого сырья различают DED-технологии с использованием металлической проволоки или металлопорошковой композиции (ГОСТ Р 70242-2022). Одним из преимуществ проволочных технологий является возможность применения широкого ассортимента материалов в виде сварочной проволоки: нелегированных, легированных, нержавеющей стали, алюминиевых, титановых, никелевых, медных, медноникелевых, магниевых сплавов, тантала, вольфрама, ниобия, молибдена, циркония, бронзы, инвара и др.

В DED-процессах применяются лучевые и электродуговые источники энергии для плавки (осаждения) материалов. Различают технологии DED-EB – с применением электроннолучевой плавки (EBF3 – electron-beam freeform fabrication); DED-L – с применением лазерной наплавки проволокой (LWC – laser wire cladding); DED-WAAM – на основе электродуговой сварки в среде газа (WAAM – wire arc additive manufacturing); DED-P – с применением быстрой плазменной наплавки (RPD – Rapid Plasma Deposition). Также применяются комбинированные источники энергии, например, плазма и плавящийся электрод [1].

Технологии DED-WAAM считаются наиболее экономичным вариантом среди технологий DED [1 – 3, 6, 7]. Достоинства – высокая энергоэффективность, производительность процесса и коэффициент использования материалов, высокая механическая прочность, плотность и низкая пористость материала изделия, стоимость оборудования и материалов (проволока дешевле порошка в 2 – 10 раз).

Основными задачами, позволяющими обосновать применимость и эффективность WAAM-технологий изготовления изделий из различных материалов проволочных электродов, являются определение факторов, влияющих на производительность процесса и формирование требуемых параметров качества, обеспечение технологической гибкости процесса для управления параметрами качества, определение стратегий управления и контроля WAAM-процессов с целью повышения их

надёжности и воспроизводимости.

Для реализации WAAM-технологий применяют следующие виды сварочных процессов (ГОСТ Р 4063-2010): GMAW (Gas-shielded Metal Arc Welding) – дуговая сварка плавящимся электродом (проволокой) в среде защитного газа (инертный или активный газ, MIG/MAG-сварка (Metal Inert/Active Gas)); GTAW (Gas-shielded Tungsten Arc Welding) – дуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в среде защитного газа (инертный газ, TIG-сварка (Tungsten Inert Gas)); PAW (Plasma Arc Welding) – дуговая плазменная сварка [2, 3, 6, 7].

Исследования показали, что WAAM-процессы на основе GMAW имеет больше преимуществ, по сравнению с GTAW и PAW. Производительность GMAW в 2 – 3 раза больше производительности GTAW и PAW. В процессах GMAW скорость наплавки составляет 3...4 кг/ч; для GTAW: 1...2 кг/ч; для PAW: 2...3 кг/ч [2, 7, 8]. Энергоэффективность GMAW составляет до 85 %, GTAW – 65 % [7]. GMAW относительно проще в реализации, поскольку не требует отдельной подачи проволоки и специальной установки для переориентации проволоки и направления осаждения металла, так как проволока подаётся соосно со сварочной головкой, траектория движения инструмента становится более простой [2, 3, 6].

Управляющие технологические факторы WAAM-GMAW-процессов

Обеспечение требуемой точности размеров, геометрических параметров качества и физико-механических свойств материала изделий, формируемых WAAM-методами, основанными на сварочных процессах GMAW, зависит от множества факторов, которые условно можно разделить на три группы [2 – 4, 7, 8]:

1. Свойства материала проволоки (электрода) – химический состав; твердость; прочность; пластичность; постоянство диаметра проволоки и т.п.;

2. Конструкторско-технологические параметры – диаметр проволоки; тип приспособления для подачи проволоки; тип защитного газа; оснастка для управления тепловыми потоками; мощность источника энергии; род тока (постоянный, переменный); тип полярности тока;

3. Технологические параметры – скорость подачи проволоки в зону сварочной дуги (м/мин), скорость перемещения сварочной головки (сварочной ванны) (мм/мин), сила тока источника питания сварочной дуги (А), напряжение источника питания (В), режим переноса металла; расход газа при наплавке (л/мин), угол наклона сварочной головки относительно наплавляемой поверхности; расстояние от мундштука головки до изделия, траектория формообразующих движений, величина перекрытия валиков, шаг наплавки (приращения), температура осажденного слоя, температура осажденного слоя перед выполнением следующего прохода; скорость тепловых потоков и др.

Выходными параметрами процесса, по которым оценивают технологические возможности WAAM-метода, являются толщина и ширина наплавляемого слоя, сплошность и монолитность наплавленного слоя, микроструктура наплавленного материала (размер зерна, фазовая структура, однородность, плотность изменения микроструктуры по глубине слоя и т.д.), наличие внутренних дефектов и пористость, величина остаточных напряжений, твердость; прочность; пластичность; производительность процесса и др.

Одним из управляющих факторов технологии WAAM-GMAW, влияющим на скорость осаждения материала, является полярность подключения проволоки-электрода. Предпочтительно использовать постоянный ток обратной полярности – DCRP (электрод подключается к клемме «+» источника питания, а подложка/заготовка подключена к клемме «-»), так как обеспечивается высокая скорость осаждения металла, стабильность сварочной дуги, низкий уровень разбрызгивания металла.

Режим переноса металла в процессе его осаждения влияет на формирование механических свойств и типа микроструктуры материала изделия, получаемого WAAM-методом на основе GMAW. В ГОСТ Р 4063-2010 определены 4 типа переноса: капельный перенос, перенос с коротким замыканием, струйный, импульсный. Также при сварке применяют холодный перенос металла (СМТ – cold metal transfer) – усовершенствованный процесс переноса с коротким замыканием, разработанный компанией Fronius (Австрия) [4, 9].

Капельный режим обеспечивает высокую производительность и скорость осаждения [7], наблюдается при среднем значении силы тока

и высоком значении сварочного напряжения. На конце электрода выделяется большое количество тепла, образуются крупные (размером больше диаметра электрода) неправильной формы капли расплавленного металла, падающие под действием силы тяжести. Направление движения капель не совпадает с осью электрода, поэтому повышается разбрызгивание и испарение и ухудшается качество шва.

Режим переноса металла с коротким замыканием возникает при низком значении силы тока и среднем значении напряжения. При таком режиме поверхностное натяжение в расплаве и электромагнитные силы являются преобладающими, притягивают расплавленные капли в ванну расплава, создавая «мост» в межэлектродном зазоре, что приводит к состоянию короткого замыкания. Частота замыкания превышает 100 Гц. Такой тип переноса металла позволяет получать капли с низким риском деформации (из-за низкой тепловой нагрузки). Требуется контроль управляющих параметров для исключения чрезмерного разбрызгивания и появления дефектов неполного сплавления [4, 7].

Струйный перенос металла наблюдается при повышенных значениях силы тока, по сравнению с режимом переноса коротким замыканием. При этом образуются мелкие капли без разбрызгивания, поверхность изделия формируется с низкой шероховатостью. Высокая теплоотдача (при испарении) позволяет увеличить скорость осаждения. Но при этом повышается интенсивность выделения сварочных аэрозолей (задымление) [4, 7].

Импульсный перенос металла наблюдается при пульсирующем токе в виде импульсов сложной формы. При этом происходит бесконтактный перенос металла с электрода в сварочную ванну. Управление процессом импульсного переноса осуществляется регулированием амплитуды и длительности пикового значения сварочного тока. При осаждении металла образуются мелкие капли, металл практически не разбрызгивается, снижается скорость подачи проволоки, повышается производительность. В этом режиме образуются длинные столбчатые зёрна с дендритной микроструктурой металла, благодаря чему обеспечивается высокая механическая прочность вдоль направления осаждения капель [3, 7].

Холодный перенос металла (СМТ) основан на принципе контролируемой металлизации погружением, при котором осуществляется возвратно-поступательное движение электрода с частотой до 70 Гц и выше – как только происходит короткое замыкание, он отводится назад [4, 9]. Это обеспечивает задержку во времени для охлаждения ранее осажденной капли металла перед осаждением новой. Таким образом, в ванне расплава выделяется меньше тепла, что является преимуществом метода. Перенос капель осуществляется без разбрызгивания, а размер зёрен небольшой, так как в этом процессе электромагнитная сила выше, что создаёт более сильный эффект перемешивания расплава, но растёт пористость материала [4, 7, 9, 10].

Особенности режимов переноса металла представлены в табл. 1 [7].

1. Особенности режимов переноса металла в WAAM-технологиях на основе GMAW [7]

1. Features of metal transfer modes in GMAW-based WAAM technologies [7]

Тип переноса	Характеристики процесса						
	Сила тока I , А	Напряжение U , В	Тепловой поток	Стабильность дуги	Скорость осаждения	Разбрызгивание	Качество наплавки
Капельный	200...300	20...30	+++	+	+++	+++	+
Коротким замыканием	100...200	15...22	+	++	+	++	++
Струйный	290...450	28...35	+++	+++	+++	+	+++
Импульсный	300...350*	25...35	+	+++	++	++	+++
Холодный	50...150	10...20	+	+++	+++	+	+++

Примечание. * – пиковые значения. Показатель: + – низкий; ++ – средний; +++ – высокий

Для получения качественных изделий WAAM-методами необходимо контролировать силу тока и напряжение источника питания сварочной дуги, скорость подачи проволоки, скорость перемещения сварочной головки (сварочной ванны) и др. Эти параметры напрямую влияют на характеристики качества наплавленного металла и тепловую нагрузку (мощность) процесса наплавки. Чрезмерное количество тепла, затрачиваемого при осаждении металла, приведет к повторному расплавлению ранее нанесенных слоев, что ухудшит макроструктуру и геометрию наплавливаемых валиков. Низкая тепловая нагрузка обеспечивает равномерную поверхность наплавки без перетекания сварочной ванны через край. Снижается пористость структуры осаждаемого металла и степень растворимости газа в расплаве [4, 6].

При снижении тепловых потоков соотношение ширины к высоте наплавливаемого валика снижается, так как расплавленный металл не успевает растечься до затвердевания. При увеличении тепловых потоков вязкость расплавленного металла снижается, и он растекается лучше. Разницу в теплоотдаче между двумя последовательно наплавливаемыми слоями можно снизить за счет выбора способа их охлаждения в процессе осаждения, что позволит обеспечить равномерную геометрию валика [4, 6].

Сила тока влияет на скорость плавления электрода, глубину проплавления, геометрию сварного шва, скорость наплавки, шероховатость наплавливаемой поверхности [2, 3]. Увеличение силы тока позволяет увеличить скорость наплавки, толщину валика (слоя), глубину проплавления, что повышает прочность соединения слоев [5]. Шероховатость поверхности валика (слоя) уменьшается с ростом силы тока.

Напряжение сварочной дуги также влияет на глубину проплавления. При высоком напряжении ширина наплавливаемых слоев увеличивается, а высота уменьшается [2, 3]. Для сохранения формы валика при повышении температуры предварительного нагрева следует уменьшить напряжение [3, 6].

Скорость перемещения сварочной головки (ванны расплава) влияет на качество наплавливаемого слоя. С увеличением скорости перемещения уменьшается глубина проплавления, ширина наплавленного валика, увеличивается шероховатость поверхности. Повышение скорости снижает тепловую нагрузку на

осаждаемые слои на 5...20 % в зависимости от вида материала, что увеличивает скорость затвердевания валика и обеспечивает равномерность наплавки [3 – 5, 8].

Скорости подачи проволоки влияет на высоту наплавливаемого валика – при высокой подаче валики получаются высокими и узкими. Глубина проплавления от подачи не зависит [4, 5, 8].

Высоту и ширину наплавливаемого слоя можно эффективно контролировать, регулируя отношение скорости подачи проволоки к скорости перемещения сварочной головки [2].

Важным управляющим фактором WAAM-процесса на основе GMAW является состав защитного газа, позволяющего защитить сварочную ванну от внешней среды и предотвратить растрескивание осаждаемых слоев, появления пористости, появления нежелательных соединений в виде оксидов, нитридов и др. Используются инертные или активные газы.

В качестве активных газов применяют углекислый газ CO_2 , азот N_2 , водород H_2 .

Углекислый газ используется благодаря низкой стоимости и доступности. Его применение может инициировать образование оксидов, разбрызгивание [8, 12].

При использовании чистого азота N_2 в качестве защитного газа формируется нестабильная электрическая дуга, образуются чешуйчатые нитриды, которые значительно влияют на пластичность и прочность материала изделия. Предел прочности на разрыв и относительное удлинение детали снижаются, а процент анизотропии одновременно повышается [13].

С применением инертного газа (аргон Ar или гелий He) достигается стабильность сварочной дуги, вероятность разбрызгивания, образования оксидов металлов и пор снижается [4, 7, 8, 12, 13].

Траектория формообразующих движений сварочной головки в процессах WAAM-GMAW оказывает значительное влияние на распределение температуры в осаждаемых слоях, геометрическую точность и форму изготавливаемой заготовки, отсутствие сплавления, на формирование механических свойств, остаточных напряжений и др. [14].

Моделирование траектории формообразующих движений сварочной головки осуществляется с использованием растровой, контурной и зигзагообразной стратегий (рис. 1)

[3, 6]. Остальные модели траекторий являются либо вариациями, либо комбинациями базовых моделей. В растровой модели смещение оси инструмента выполняется параллельно заданному направлению наплавки, что нередко требует частого поворота инструмента и приводит к ухудшению качества изготовления заготовки. Зигзагообразная модель, почти не отличается от растровой, она представляет собой один непрерывный технологический переход,

соединяющий параллельные линии наплавки [3]. Обе модели имеют низкую точность формирования внешнего контура заготовки из-за ошибок дискретизации [6]. В контурной модели смещение инструмента выполняется параллельно профилю предыдущего осажденного слоя, наплавка осуществляется от внешнего контура заготовки к внутренней части [3, 6, 8].

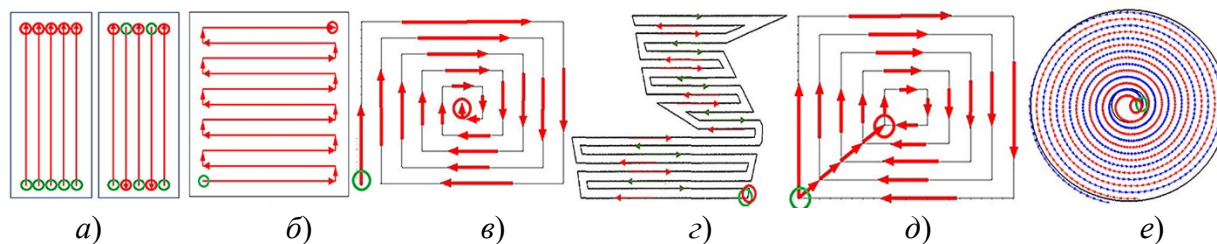


Рис. 1. Модели траектории наплавки в технологии WAAM-GMAW:

a – растровая; *б* – зигзагообразная; *в*, *г* – контурная; *д* – контурно-параллельная; *е* – контурно-спиральная

Fig. 1. Model of the surfacing trajectory in WAAM-GMAW technology [3]:

a – raster; *b* – zigzag; *c*, *d* – contour; *e* – contour-parallel; *f* – contour-spiral

При проектировании траектории наплавки необходимо учитывать шаг смещения оси сварочной головки для обеспечения перекрытия наплавляемых валиков. Шаг смещения S различается для разных WAAM-процессов. Он зависит от диаметра проволоки, скорости наплавки и скорости подачи проволоки и может принимать значения от 2 до 12 мм [6]. Уменьшение расстояния S между валиками снижает производительность наплавки. Расстояние S можно определить по ширине w наплавляемого валика. Для зигзагообразных и контурных траекторий движения фидстока оптимальное расстояние перекрытия составляет почти половину ширины w валика. Анализ различных моделей с перекрывающимися валиками показали, что оптимальное расстояние между осями валиков $S = 0,667w$ или $S = 0,738w$ [15].

Свойства изделий, полученных методами WAAM-GMAW. Дефекты и проблемы

Наряду с достоинствами, связанными с обеспечением высоких производительности и энергоэффективности, механических свойств и плотности материалов заготовок, низкой себестоимостью, WAAM-технологий на основе GMAW имеют и характерные недостатки.

Заметная шероховатость и волнистость поверхности, возможно перетекание металла с боковой поверхности, анизотропия механических свойств, остаточные напряжения, образование пор и трещин, длинные столбчатые зёрна в кристаллической структуре и др. [7 – 11].

Исследования сплавов на основе титана и алюминия показали, что по всей высоте осаждённого материала изделия наблюдаются разные значения предела прочности при растяжении σ_b , предел текучести σ_t , микротвёрдости. Различия в механических свойствах по высоте заготовки связаны с изменением температурного градиента и скоростью охлаждения осаждаемых слоев [4, 8, 16]. На механические свойства и анизотропию металлов влияют размер и строение зёрен. Мелкозернистые микроструктуры обладают более высокими механическими свойствами. Контролировать изменение микроструктуры в WAAM-процессах сложно из-за многократных циклов плавления-затвердевания и температурных градиентов [3].

Подверженность различных материалов различным дефектам представлена в таблице 2 [6]. Например, пористость характерна для алюминиевых сплавов, образование трещин – для никелевых сплавов, для титановых сплавов – окисление и т.п.

2. Взаимосвязь между различными материалами/сплавами и дефектами после изготовления изделий WAAM-методами [6]

2. The relationship between different materials/alloys and defects after WAAM manufacturing [6]

Дефекты	Материал / Сплав				
	Титан	Алюминий	Сталь	Никель	Биметаллический
Трещины	++	+++	+++	++++	++++
Качество поверхности	+	++	+++++	+++	+++
Деформация	+++	++++	++++	++	+++++
Пористость	+	+++++	++	+++	++
Остаточное напряжение	+++	++++	++++	+++	+++++
Расслоение	+	+	+↑	+++	++
Окисление	+++++	+++	+++	+	+++

Примечание. + – низкая; ++ – средняя; +++ – умеренная; ++++ – большая; +++++ – очень большая

Остаточные напряжения в основном возникают из-за неравномерного распределения тепла и приводят к деформации заготовок, изменению макроотклонений, расслоению в процессе наплавки, снижению усталостной прочности и сопротивления разрушению [2]. В тонкостенных конструкциях было обнаружено, что наибольшее продольное напряжение возникает у основания. Однако деформация уменьшается с увеличением количества слоев [3]. Остаточное напряжение также зависит от силы сварочного тока. Диапазон значений остаточных напряжений увеличивается при увеличении сварочного тока [4, 8].

Пористость снижает механическую прочность заготовок и ухудшает усталостную прочность нанесённого слоя [17]. В расплавленном металле происходит поглощение водорода, кислорода и азота [2, 8], что при затвердевании приводит к дефекту в виде пор.

Пористость зависит от скорости и плотности потока защитного газа, стабильности процесса осаждения и траектории формообразующих движений, качества исходного сырья – сварочной проволоки и технологических факторов процесса [2]. Проволока обычно имеет на поверхности различные загрязнения, которые при наплавке проникают в расплав и образуют поры после затвердевания. Очистка и обезжиривание проволоки могут помочь также

свести к минимуму загрязнение водородом.

Трещины и расслоение связаны с характеристиками материала, из которого изготовлена заготовка, а также с тепловыми параметрами процесса наплавки. В изделиях, изготовленных методом WAAM, образуются два типа трещин: межкристаллические трещины и трещины, возникающие при затвердевании. Межкристаллические трещины возникают вдоль границ зёрен из-за их разного строения и образования осадков. Трещины, возникающие при затвердевании, в основном возникают из-за чрезмерного образования растворённых в металле веществ, препятствующих затвердеванию расплава или при затруднении отвода тепла от затвердевающего металла [3].

Влияние технологических факторов на формирование параметров качества изделий

Регулирование управляющих параметров WAAM-GMAW процессов является единственным способом управления параметрами качества изготовленного изделия. Сведения о степени влияния управляющих технологических факторов WAAM-GMAW на параметры процесса наплавки и формируемые параметры качества изделия представлены в таблице 3 [7].

3. Влияние технологических факторов WAAM-GMAW-процессов на параметры процесса наплавки и формируемые параметры качества изделия [7]

3. The influence of technological factors of WAAM-GMAW on the WOL parameters and the generated product quality parameters [7]

Параметры	Технологические факторы	Степень влияния
Ширина и высота наплавленного валика	Сварочный ток I , А	+
	Сварочное напряжение U , В	++
	Скорость подачи проволоки, м/мин	+
	Скорость движения сварочной головки, мм/мин	+++
	Время выдержки перед нанесением слоя, мин	+++
	Температура промежуточного слоя, °С	+
	Тепловая нагрузка (погонная энергия), Дж/мм	++
	Расстояние от мундштука до поверхности, мм	++
	Расход защитного газа, л/мин	++
Скорость осаждения	Сварочный ток I , А	+++
	Сварочное напряжение U , В	++
	Скорость подачи проволоки, м/мин	+++
	Тепловая нагрузка (погонная энергия), Дж/мм	+++
	Диаметр электрода, мм	+++
	Расход защитного газа, л/мин	++
Вытекание расплавленного металла из сварочной ванны	Сварочный ток I , А	+
	Скорость движения сварочной головки, мм/мин	+++
	Тепловая нагрузка (погонная энергия), Дж/мм	++
	Время выдержки перед нанесением слоя, мин	+++
	Температура межслойная, °С	+++
	Расход защитного газа, л/мин	+++
Качество поверхности и пористость	Сварочный ток I , А	+
	Сварочное напряжение U , В	++
	Тепловая нагрузка (погонная энергия), Дж/мм	+
	Время выдержки перед нанесением слоя, мин	+++
	Расход защитного газа, л/мин	+++
Разбрызгивание	Сварочное напряжение U , В	++
	Скорость подачи проволоки, м/мин	+
	Расход защитного газа, л/мин	++
	Расстояние от мундштука до поверхности, мм	++
	Температура межслойная, °С	+
	Диаметр электрода, мм	++
Измельчение зерен и образование различных фаз	Сварочный ток I , А	++
	Сварочное напряжение U , В	+
	Скорость подачи проволоки, м/мин	++
	Скорость движения сварочной головки, мм/мин	+++
	Тепловая нагрузка (погонная энергия), Дж/мм	+
	Время выдержки перед нанесением слоя, мин	++
	Температура межслойная, °С	+
	Расход защитного газа, л/мин	++
Механические характеристики: предел прочности при растяжении, предел текучести, относительное удлинение, микротвердость)	Сварочный ток I , А	++
	Сварочное напряжение U , В	+
	Скорость подачи проволоки, м/мин	++
	Скорость движения сварочной головки, мм/мин	++
	Время выдержки перед нанесением слоя, мин	++
	Расход защитного газа, л/мин	++
	Тепловая нагрузка (погонная энергия), Дж/мм	++

Примечание. Степень влияния: + – низкая; ++ – средняя; +++ – высокая

Тепловые потоки и температурный градиент определяют направление роста зерна, который происходит в направлении, противоположном тепловому потоку [7]. Большое значение имеет моделирование тепловых процессов при изготовлении изделий, исследование закономерностей нагрева и охлаждения отдельных синтезируемых слоев и детали в целом. Важной информацией является время выдержки объемов материала выше температуры рекристаллизации. Для управления градиентом изменения температур вначале создается модель материала [18], выявляются факторы, оказывающие доминирующее влияние на распределение тепловых потоков [19].

Заключение

Несмотря на ряд преимуществ, по сравнению с другими методами аддитивного производства, для технологии WAAM-GMAW характерен ряд недостатков. Одной из проблем является возможность воспроизводимости процесса – незначительное изменение технологических параметров может привести к снижению качества изделий.

Поэтому одной из задач повышения надёжности технологического процесса является обеспечение управления технологическими параметрами, для чего необходимо обеспечить обратную связь с управляющим устройством оборудования, что требует, в свою очередь понимания взаимосвязи управляющих факторов с выходными характеристиками процесса.

Для улучшения механических свойств, качества поверхности, геометрических характеристик и микроструктурных свойств изготавливаемых методами WAAM-GMAW изделий предложены различные подходы – оптимизация траектории формообразующих движений; применение процессов термообработки; применение активного охлаждения или технологии охлаждения погружением в жидкость в процессе наплавки; совмещение GMAW-процессов с методами фрезерования, поверхностного упрочнения (прокатки, ковки,

ультразвуковой обработки); применения пассивной системы технического зрения; двойных электродов и др. [2 – 7, 10, 11].

Оптимизация технологических параметров процессов, мониторинг и контроль процесса в реальном времени, создание гибридных технологий приведут к лучшему пониманию и широкому внедрению технологии WAAM-GMAW.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Трубашевский Д.С. Аддитивные зарисовки, или решения для тех, кто не хочет продолжать терять деньги. Воронеж : Умное Производство, 2021. 203 с.
2. Li Y., Su C., Zhu J. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // Results in Engineering. 2022. Vol. 13. 100330. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100330.
3. Srivastava M., Rathee S., Tiwari A., Dongre M. Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour // Materials Chemistry and Physics. 2023. Vol. 294. 126988. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126988.
4. Kesarwani S., Yuvaraj N., Niranjana M. S. CMT-based WAAM: a comprehensive review of process parameters, their effects, challenges, and future scope // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2024. Vol. 46. 699. DOI: 10.1007/s40430-024-05276-0.
5. Singh S.R., Khanna P. Wire arc additive manufacturing (WAAM): a new process to shape engineering materials // Materials Today Proc.. 2021. Vol. 44. Pp. 118–128. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.030.
6. Tomar Bunt, Shiva S., Nath Tameshwer. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances // Materials today communications. 2022. Vol. 31.103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739.
7. Suvranshu P., Susanta K. S. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2021. Vol. 33. Pp. 398–442. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010.
8. 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 and Design. 2021. Vol. 202. 109471. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109471.
9. Wang C., Ding J., Williams S. Process control methods in cold wire gas metal arc additive manufacturing // Metals. 2023. Vol. 13 (8). 1334. DOI: 10.3390/met13081334

10. **Rajendra Prasad, Yuvaraj N., Vipin** A review on wire arc additive manufacturing based on cold metal transfer // *Materials and manufacturing processes*. 2024. Vol. 39 (10). Pp. 1315–1341. DOI: 10.1080/10426914.2024.2323441

11. **Yildiz A.S., Davut K., Koc B., Yilmaz O.** Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics // *The International journal of advanced manufacturing technology*. 2020. Vol. 108. Pp. 3391–3404. DOI: 10.1007/s00170-020-05482-9.

12. **Juric I., Garasic I., Busic M., Kozuh Z.** Influence of shielding gas composition on structure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Inconel 625 // *JOM*. 2019. Vol. 71 (2). DOI: 10.1007/s11837-018-3151-2.

13. **Li S., Zhang L.J., Ning J., Wang X., Zhang G.F., Zhang J.X., Na S.J., Fatemeh B.** Comparative Study on the microstructures and properties of wire+arc additively manufactured 5356 aluminium alloy with argon and nitrogen as the shielding gas // *Additive manufacturing*. 2020. Vol. 34.101206. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101206.

14. **Киричек А.В., Сергеев А.Г., Федонина С.О., Петрешин Д.И.** Технологическое обеспечение параметров качества синтезируемой WAAM-методом детали управлением траекторией движения фидстока // *Транспортное машиностроение*. 2022. № 4 (44). С. 60–68. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-4-60-68.

15. **Nguyen L., Buhl J., Vambach M.** Multi-bead Overlapping Models for Tool Path Generation in Wire-Arc Additive Manufacturing Processes // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 47. Pp. 1123–1128. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.129.

16. **Кузнецов М.А., Данилов В.И., Крампит М.А., Чинахов Д.А., Слободян М.С.** Механические и трибологические свойства металлической стенки, выращенной электродуговым способом в среде защитных газов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22, № 3. С. 18–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-18-32.

17. **Киричек А.В., Федонин О.Н., Федонина С.О., Сергеев А.Г.** Сравнительная оценка влияния технологий аддитивного синтеза на количество и размер пор в изделии // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2022, № 5 (131). С. 20–26. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-5-20-26.

18. **Киричек А.В., Баринов С.В., Яшин А.В., Федонина С.О., Андросов К.Ю.** Разработка и верификация моделей материалов при моделировании процессов волнового деформационного упрочнения и аддитивного синтеза (3DMP) // *Тракторы и сельхозмашины*, 2024. Том 91. № 6. С. 611–618. DOI: 10.17816/0321-4443-637300.

19. **Киричек А.В., Баринов С.В., Греченева А.В.**

Расчет температурных полей на основе конечно-элементной модели процесса аддитивного синтеза изделия // *Прикладная информатика*. 2024. Т. 19. № 6. С. 113–128. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-113-128.

REFERENCES

1. Trubachevsky D. S. Additive sketches, or solutions for those who don't want to keep losing money. *Voronezh: Smart Manufacturing*, 2021, 203 p.

2. Li Y., Su C., Zhu J. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // *Results in Engineering*. 2022. Vol. 13.100330. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100330.

3. Srivastava M., Rathee S., Tiwari A., Dongre M. [Wire arc additive manufacturing of metals: A review on processes, materials and their behaviour](#) // *Materials Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 294. 126988. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126988.

4. Kesarwani S., Yuvaraj N., Niranjana M. S. CMT-based WAAM: a comprehensive review of process parameters, their effects, challenges, and future scope // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2024. Vol. 46. 699. DOI: 10.1007/s40430-024-05276-0.

5. Singh S.R., Khanna P. Wire arc additive manufacturing (WAAM): a new process to shape engineering materials // *Materials Today Proc.* 2021. Vol. 44. Pp. 118–128. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.030.

6. Tomar Bunty, Shiva S., Nath Tameshwer. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances // *Materials today communications*. 2022. Vol. 31. 103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739.

7. Suvranshu P., Susanta K. S. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Vol. 33. Pp. 398–442. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010.

8. 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 and Design*. 2021. Vol. 202. 109471. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109471.

9. Wang C., Ding J., Williams S. Process control methods in cold wire gas metal arc additive manufacturing // *Metals*. 2023. Vol. 13 (8). 1334. DOI: 10.3390/met13081334

10. Rajendra Prasad, Yuvaraj N., Vipin A review on wire arc additive manufacturing based on cold metal transfer // *Materials and manufacturing processes*. 2024. Vol. 39 (10). Pp. 1315–1341. DOI: 10.1080/10426914.2024.2323441

11. Yildiz A.S., Davut K., Koc B., Yilmaz O. Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics // *The International journal of*

advanced manufacturing technology. 2020. Vol. 108. Pp. 3391-3404. DOI: 10.1007/s00170-020-05482-9.

12. Juric I., Garasic I., Busic M., Kozuh Z. Influence of shielding gas composition on structure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Inconel 625 // JOM. 2019. Vol. 71 (2). DOI: [10.1007/s11837-018-3151-2](https://doi.org/10.1007/s11837-018-3151-2).

13. Li S., Zhang L.J., Ning J., Wang X., Zhang G.F., Zhang J.X., Na S.J., Fatemeh B. Comparative Study on the microstructures and properties of wire+arc additively manufactured 5356 aluminium alloy with argon and nitrogen as the shielding gas // Additive manufacturing. 2020. Vol. 34. 101206. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101206.

14. Kirichek A.V., Sergeev A. G., Fedonina S. O., Petreshin D. I. Technological support of the quality parameters of the part using waam-method by controlling the feedstock path. Transport Engineering. 2022, no. 4 (44), pp. 60–68. DOI: 10.30987/2782-5957-2022-4-60-68

15. Nguyen L., Buhl J., Bambach M. Multi-bead Overlapping Models for Tool Path Generation in Wire-Arc Additive Manufacturing Processes // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 47. Pp. 1123–1128. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.129.

16. Kuznetsov M.A., Danilov V.I., Krampit M.A., Chinkhovich D.A., Slobodyan M.S. Mechanical and tribological properties of a metal wall grown by an electric arc method in an atmosphere of shielding gas// Metalworking (technology, equipment, tools). 2020, vol. 22. no. 3. pp. 18–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-18-32.

17. Kirichek A.V., Fedonin O. N., Fedonina S. O., Sergeev A. G. Comparative evaluation of the effect of additive synthesis technologies on the number and size of pores in the product // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2022, no. 5 (131). pp. 20–26. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-5-20-26.

18. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V., Fedonina S.O., Androsov K.Y. Development and verification of material models for modeling wave deformation hardening and additive synthesis (3DMP) processes // Tractors and Agricultural Machinery. 2024. vol. 91. no. 6. pp. 611–618. DOI: 10.17816/0321-4443-637300.

19. Kirichek A.V., Barinov S.V., Grecheneva A.V. Calculation of temperature fields based on a finite element model of the additive synthesis process of a product // Applied Computer Science. 2024. vol. 19. no. 6. pp. 113–128. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-113-128.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.02.2025; одобрена после рецензирования 05.03.2025; принята к публикации 14.03.2025.

The article was submitted 21.02.2025; approved after reviewing 05.03.2025; asseped for publication 14.03.2025.