

ЭЛЕКТРОДУГОВОЕ ВЫРАЩИВАНИЕ ПРОВОЛОКОЙ: ДОСТУПНОСТЬ, СКРЫТЫЕ СЛОЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Балякин А.В.¹, Олейник М.А.¹, Скуратов Д.Л.¹, Носова Е.А.¹

¹Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва, г. Самара, balaykinav@ssau.ru

Ключевые слова: ЭДВ, WAAM, аддитивное производство, термические циклы, остаточные напряжения, технологическая доступность, экономическая целесообразность.

Технология электродугового выращивания проволокой (ЭДВ или WAAM) часто позиционируется как отдельная категория аддитивного производства металлов, связанная с крупногабаритными деталями и высокой скоростью выращивания. Однако по своей физической сути ЭДВ – это не принципиально новый метод, а сочетание хорошо зарекомендовавших себя технологий: роботизированное управление движением, электрическая дуга в качестве источника тепла и металлическая проволока в качестве присадочного материала. Важно понимать, что ЭДВ – это сварка, а не «магия». Дуга ведёт себя так же, как при сварке, материал подчиняется установленным металлургическим принципам, а тепловые циклы следуют закономерностям, изученным десятилетиями. Меняется не фундаментальная наука, а способ её применения для создания трёхмерной геометрии. ЭДВ не устраняет ограничения, связанные с подводом тепла, деформациями и поведением материала, а переносит их в новый производственный контекст, где они накапливаются и усиливаются с каждым слоем.

Одной из определяющих характеристик ЭДВ является доступность: необходимые компоненты широко доступны, принципы работы хорошо изучены, а первые результаты можно получить без значительных затрат. Эта доступность стимулирует интерес и развитие области. Однако доступность не следует путать с простотой. Первоначальный порог вхождения относительно невысок, но сложность резко возрастает по мере перехода к более сложным геометрическим формам, длительным циклам сборки и требованиям промышленной надёжности. Системы, которые на первый взгляд кажутся идентичными по аппаратной конфигурации, могут вести себя совершенно по-разному при работе в неконтролируемых условиях. Ранний успех часто достигается в узком диапазоне условий, и расширение этого диапазона требует иного уровня понимания, выходящего за рамки базовой сборки компонентов.

ЭДВ часто представляют в виде набора хорошо изученных элементов: робот, источник питания, подающий механизм. Однако сложность возникает при их совместной работе в течение длительного времени. При осаждении материала тепловая нагрузка, геометрия и превращение материала взаимодействуют, создавая обратную связь, а не линейную последовательность. Например, изменение силы тока не просто регулирует тепловложение, но изменяет тепловое поле, влияет на затвердевание, остаточные напряжения и искажение геометрии, что, в свою очередь, меняет условия осаждения следующего слоя. Это непрерывно развивающийся цикл. Поэтому наборы параметров не всегда работают одинаково: комбинация, стабильная для одной геометрии, может дать сбой в другой из-за изменившегося контекста. Система определяется не только входными параметрами, но и своим текущим состоянием, которое меняется в процессе сборки.

Стабильность в ЭДВ – это не фиксированное состояние, а активная задача. При изготовлении небольших деталей или простых геометрий система может демонстрировать локальное равновесие, но по мере накопления слоёв и изменения геометрии тепловые условия меняются, небольшие отклонения накапливаются и взаимодейс-

твуют. Поддержание стабильности требует постоянной адаптации. Геометрия в ЭДВ – это не внешняя спецификация, а неотъемлемая часть процесса. Изменение геометрии влияет на тепловое поле, порядок осаждения, условия поддержки последующих слоёв, а также на микроструктуру и остаточные напряжения. Каждая новая геометрия создаёт новую задачу, и опыт помогает, но не избавляет от необходимости пересматривать подход.

Демонстрации ЭДВ эффективно показывают принципиальную возможность изготовления детали, но они проводятся в условиях, минимизирующих неопределённость. При переходе к серийному производству возникают отклонения, связанные с геометрией и вариабельностью условий. Усилия, необходимые для стабилизации процесса для новой геометрии, часто не зависят от количества деталей, поскольку требуют глубокого понимания взаимодействия геометрии и системы. Разница между осуществимостью (деталь можно изготовить) и контролем (деталь можно изготавливать надёжно и повторяемо) – это главный источник затрат и рисков. Большая часть работы сосредоточена именно на этом переходе.

Экономическое обоснование ЭДВ начинается не с первой успешной детали, а с оценки усилий, необходимых для стабильного производства с соблюдением допусков и в промышленных условиях. Эти усилия включают: разработку параметров для различных материалов и геометрий, итеративные сборки, разрушающие и неразрушающие испытания, проверку свойств, разработку стратегий контроля, сбор данных для аттестации и сертификации. Прогресс редко бывает линейным, и многие этапы требуют многократных циклов. Релевантной единицей сравнения является не отдельная деталь, а программа производства в целом. Традиционные процессы имеют предсказуемые затраты, тогда как ЭДВ требует формирования понимания с нуля, с учётом времени, капитала и неопределённости.

Ценность ЭДВ сильно зависит от контекста. Там, где критичны доступность, сроки выполнения или стратегические возможности (ремонт, оборона, ограниченные цепочки поставок), готовность инвестировать высока. Там, где доминируют соображения стоимости и предсказуемости, ЭДВ должен быть эффективным и конкурентоспособным с традиционными процессами, оптимизированными десятилетиями. Один и тот же набор возможностей может быть эффективен в одном контексте и неэффективен в другом. Экономическое обоснование не может быть универсальным.

Внедрение ЭДВ происходит в отраслях с высокой инерцией (аэрокосмическая, оборонная, энергетическая), где решения основаны на оценке рисков и сертификации. Программы длятся дольше, чем типичные циклы распределения ресурсов, что создаёт зависимость между техническим прогрессом и организационной стабильностью. Успех требует непрерывности усилий на протяжении длительного времени. Кроме того, на стороне поставщиков систем ЭДВ наблюдается структурное противоречие: аппаратные компоненты унифицированы, вход на рынок доступен, но видимая дифференциация низка, а цены находятся под давлением. При этом инвестиции в разработку процессов и поддержку клиентов высоки и малозаметны, что создаёт дисбаланс между структурой затрат и потенциальной выручкой. Рынок, по-видимому, не может поддерживать большое количество независимых поставщиков – консолидация или банкротства являются структурным следствием.

Для ЭДВ ключевой вопрос не «работает ли процесс?», а «при каких условиях он оправдывает полные затраты на внедрение?». Эти затраты включают не только систему, но и усилия по стабилизации, организационные обязательства и риски. Ценность технологии контекстно-зависима. Признание этого позволяет более реалистично оценивать перспективы ЭДВ: там, где он позволяет преодолеть существенное ограничение, не достижимое традиционными методами, и где создаваемая ценность перекрывает издержки индустриализации, он оправдан. В противном случае он остаётся многообещающим, но не востребованным в промышленности.

Список литературы

1. Williams S.W., Martina F., Addison A.C. et al. Wire + Arc Additive Manufacturing // Materials Science and Technology. – 2016. – Vol. 32. No. 7. – P. 641–647.

2. Денингер Э.Р., Хейгел Дж.К., Мишалерис П. и др. Влияние времени выдержки между слоями на искажение и остаточные напряжения при аддитивном производстве титановых и никелевых сплавов // Журнал технологических процессов. – 2015. – Т. 19. – С. 148–160.

Сведения об авторах

Балякин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей, Самарский университет; область научных интересов: аддитивные технологии, CAD/CAM-системы, инженерная графика.

Олейник Максим Андреевич – кандидат технических наук, инженер кафедры ТПД. Область научных интересов: аддитивные технологии.

Скуратов Дмитрий Леонидович – доктор технических наук, профессор; научные интересы: технология машиностроения, аддитивное производство.

Носова Екатерина Александровна – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения; научные интересы: материаловедение, аддитивные технологии.

WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING: ACCESSIBILITY, HIDDEN COMPLEXITIES AND ECONOMIC JUSTIFICATION

Balyakin A.V.¹, Oleynik M.A.¹, Skuratov D.L.¹, Nosova E.A.¹

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara,
balaykinav@ssau.ru

Keywords: WAAM, additive manufacturing, thermal cycles, residual stresses, technological accessibility, economic feasibility

The paper analyzes wire arc additive manufacturing (WAAM) as a welding-based process. It emphasizes that WAAM is not a fundamentally new method but a combination of established technologies (robotics, arc welding, wire feeding). The key distinction is between feasibility (producing a part) and industrial control (reliable, repeatable production). Accessibility lowers the entry barrier but creates an illusion of simplicity; actual complexity arises from thermal-mechanical interactions, geometry-dependent heat dissipation, and accumulation of distortions. Economic justification depends heavily on context: high-value applications (defense, repair, limited supply chains) justify investment, while cost-driven applications face challenges due to high non-recurring engineering efforts. The paper concludes that the value of WAAM is context-dependent, and realistic assessment must account for full industrialization costs, including process stabilization, certification, and organizational continuity.