

ТРЕХМЕРНАЯ ПЕЧАТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕМНЫХ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ СВАРОЧНЫХ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (Обзор)

**В. Н. КОРЖИК¹, В. Ю. ХАСКИН¹, А. А. ГРИНЮК^{1,2}, В. И. ТКАЧУК¹, С. И. ПЕЛЕШЕНКО³,
В. В. КОРОТЕНКО^{1,2}, А. А. БАБИЧ¹**

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев-56, пр-т Победы, 37. E-mail: mail@KPI.ua

³Южно-Китайский технологический университет. 510641, г. Гуанжоу, КНР. E-mail: sviatoslav@qq.com

В современной промышленности все более актуальным становится изготовление металлических изделий сложной формы при помощи трехмерной печати. Для этого чаще всего применяют лазерные технологии (SLS- и SLM-процессы), реже — электронно-лучевые (EBF₃). И те и другие отличаются достаточно высокой себестоимостью и невысокой производительностью. В данной работе рассмотрены новые тенденции применения сварочных технологий для трехмерной печати сложных металлических изделий, в том числе, дополняемых сопутствующей или последующей механической обработкой. Показано, что использование сварочных технологий для получения металлических объемных изделий значительно снижает себестоимость их изготовления при одновременном повышении производительности по сравнению с SLS- и SLM-процессами. Наиболее перспективной сварочной технологией трехмерной печати является плазменно-дуговая с применением проволок или порошков. Она позволяет при сравнительно малом тепловложении создавать качественные объемные изделия с толщиной стенки 3,0...50,0 мм из сплавов на основе Fe, Ni, Co, Cu, Ti, Al, а также композитных материалов, содержащих тугоплавкие компоненты. Применение сварочных технологий позволяет получать как сравнительно небольшие, так и длинномерные изделия, не нуждающиеся в финишной механической обработке (например, выращивать ребра жесткости на крупногабаритных панелях, создавать сотовые панели, строительные конструкции и т.д.). Сочетание сварочных технологий трехмерной печати с сопутствующей или финишной механической обработкой (чаще всего ЧПУ-фрезерованием) позволяет изготавливать готовые к применению сложнопрофильные металлические изделия. Библиогр.19, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: трехмерная печать, металлические изделия, сварочные технологии, механическая обработка, материалы, оборудование

В настоящее время трехмерная (3D) печать или быстрое прототипирование (rapid prototyping) объемных изделий сложной формы рассматривается, как «технология XXI века», которая принципиально изменит структуру промышленного производства и экономики, обеспечит автоматическое проектирование деталей, гибкость и быстроту изготовления различных изделий, перераспределение производства от больших предприятий к мелким или изготовление деталей непосредственно у потребителя [1]. Трехмерная печать — это технология аддитивного производства. Процесс начинается с получения данных виртуального проектирования посредством компьютерного моделирования с использованием программного обеспечения систем автоматизированного проектирования (Computer-aided design — CAD). Машина для 3D-печати считывает данные из файла модели CAD, с помощью программных (Computer-aided manufacturing — CAM) модулей деталь делится (режется) на слои, для каждого из которых автоматически создается траектория перемещения инструмента, которая мо-

жет учитывать множество технологических и геометрических факторов. В сумме все программы для каждого слоя формируют управляющую программу, согласно которой движется рабочий инструмент ЧПУ-манипулятора. Инструмент накладывает последовательные слои жидкого, порошкового или листового материала, создавая физическую модель из набора поперечных сечений. Эти слои, соответствующие созданным в модели САД виртуальным поперечным сечениям, автоматически соединяются для создания окончательной формы.

Существуют различные процессы трехмерной печати, но их объединяет то, что прототип изготавливается путем послойного наложения материала. Основное преимущество быстрого прототипирования состоит в том, что прототип создается за один прием, а исходными данными для него служит непосредственно геометрическая модель детали. Следовательно, при этом отпадает необходимость в планировании последовательности технологических процессов, специальном оборудовании для обработ-

3D аддитивные технологии

ки материалов на каждом этапе изготовления, транспортировке от станка к станку и т. д.

Среди известных и достаточно широко применяемых в настоящее время процессов трехмерной печати можно отметить такие, как стереолитография [2], струйное выдавливание с расплавлением термопластичного полимерного материала (Fused Deposition Modeling — FDM) [3], избирательное лазерное спекание (Selective Laser Sintering — SLS) [4]. Такие процессы, при всей их эффективности, обладают одним существенным ограничением — в качестве основного конструкционного или связующего материала в них применяется пластик, что значительно ограничивает номенклатуру изготавливаемых изделий по температуре эксплуатации, нагрузкам, механической прочности и другим показателям.

Для расширения возможностей трехмерной печати требуется наличие технологий получения высокопрочных объемных изделий из металлов, сплавов, в том числе с высокой твердостью. В ряде научно исследовательских центров США (например, NASA's Langley Research Center, Houston и Johnson Space Center, Hampton) ведется разработка электронно-лучевого процесса изготовления металлических изделий произвольной формы (Electron beam freeform fabrication — EBF₃) [5]. При этом электронный пучок используется в качестве источника энергии для плавления подава-

мой проволоки в вакууме. Данная методика была продемонстрирована на алюминиевых и титановых сплавах, представляющих интерес для аэрокосмического использования [6]. По нашему мнению, она может быть также распространена на сплавы на основе никеля и железа. Однако применение данного процесса ограничено необходимостью применения дорогостоящей и сложной вакуумной техники.

Одной из перспективных технологий получения высокопрочных объемных металлических изделий является избирательное лазерное плавление (Selective Laser Melting — SLM), обеспечивающее их формирование путем сплавления порошков из различных металлов и сплавов лазерным лучом [7]. Данная технология дает возможность получать сложные объемные металлические изделия с высокой степенью детализации их элементов и высокой плотностью (до 99 %), а также с высокой размерной точностью (± 50 мкм).

Вместе с тем, при всей его эффективности и гибкости, процесс SLM также обладает рядом ограничений, сужающих его использование (табл. 1):

необходимость применения дорогостоящего и энергетически затратного оборудования с высокой стоимостью обслуживания, что обуславливает высокую себестоимость процесса трехмерной печат-

Таблица 1. Сравнение распространенных SLM-технологий трехмерной печати металлических изделий с новой PAM-технологией на основе плазменно-дуговой сварки

Показатели	Технология трехмерной печати металлических изделий			
	Селективное лазерное плавление – SLM (фирма LENS)	Селективное лазерное плавление – SLM (фирма POM)	Селективное лазерное плавление – SLM (фирма AeroMet)	Плазменно-дуговое плавление – PAM
Характеристики используемого оборудования	Nd:YAG-лазер, мощность 1 кВт	CO ₂ -лазер, мощность 2 кВт	CO ₂ -лазер, мощность 14 кВт	На основе сварки, мощность 2...20 кВт
Производительность по наращиваемому металлу, (см ³ /час)	8	8	160	>1000...15000
Возможность обработки по осям (степеням свободы)	3 оси	3 оси	3 оси	4-5 осей
Тип используемого материала для 3D-печати	Металлический порошок	Металлический порошок	Металлический порошок	Порошки металлов, сплавов, композиционных материалов, смеси порошков. Проволока сплошная и порошковая (металлический сердечник с порошковым наполнителем)
Коэффициент использования материала, %	Около 40	Около 40	Около 70	Более 90
Области применения	Изготовление и ремонт мелких дорогостоящих деталей сложной формы	Изготовление и ремонт мелких дорогостоящих деталей сложной формы	Изготовление и ремонт мелких дорогостоящих деталей сложной формы	Изготовление и ремонт средних и крупных объемных изделий различного назначения
Ориентировочная стоимость основных единиц оборудования (за 1 кВт мощности)	Стоимость лазера 80,000...120,000 дол. США			Стоимость сварочного оборудования 1000...5000 дол. США

ти и приводит к высокой стоимости изготавливаемых изделий;

относительно низкая производительность трехмерной печати (обычно для наиболее распространенных машин не более $10 \text{ см}^3/\text{ч}$ наращиваемого металла);

ограничения по материалу – для SLM используются дорогостоящие порошки с жесткими требованиями по гранулометрическому и химическому составу, текучести и другим характеристикам;

недостаточно высокие прочностные характеристики изготовленных изделий.

С учетом сказанного, актуальным является рассмотрение сварочных технологий для трехмерной печати металлических изделий сложной формы, поскольку сварка, при большей производительности, также позволяет реализовать принцип аддитивного производства, а именно послойного формирования объемных конструкций. Кроме того, сварочные технологии разрабатывались задолго до появления трехмерной печати и являются гораздо более зрелыми и менее затратными. Поэтому сварочные процессы актуально использовать при разработке экономичного способа производства максимально плотных объемных металлических деталей и инструментов [8].

В работе [9] приводится следующая хронология попыток использования сварочных технологий для получения трехмерных конструкций сложной формы:

1926 г. Бейкер запатентовал «использование электрической дуги в качестве источника тепла для получения объемных объектов, напыляя расплавленный металл в накладываемые слои»;

1971 г. Юджи (Mitsubishi) — изготовление сосуда высокого давления используя сварку под флюсом, электрошлаковую технологию и TIG для получения изделий с функционально-градиентными стенками;

1983 г. Куссмаул использовал Shape Welding (фигурную сварку или сварку с заформовкой) для изготовления крупногабаритных изделий из высоколегированной стали (20MnMoNi5) весом 79 т;

1993 г. Принц и Вейс запатентовали комбинированную технологию наращивания материала с помощью сварки с фрезерованием на станках с ЧПУ (Shape Deposition Manufacturing – SDM);

1994–1999 гг. Университет Кренфилда разработал технологию SMD для изготовления оболочек двигателей для корпорации Rolls-Royce (Великобритания).

Также имеются данные о предпринятых в Германии в 1960-х годах попытках создания объемных металлических конструкций с помощью дуговой сварки с заформовкой (Shape Welding). На основе этого процесса такие компании, как Krupp

и Thyssen, организовали изготовление крупногабаритных деталей простой геометрии, например, сосудов высокого давления весом до 500 т [10]. Успешные попытки применения дуговой сварки для изготовления крупных металлических конструкций и изделий из аустенитных сталей были предприняты компанией The Babcock & Wilcox Company (США) в виде создания технологии под названием — процесс «плавления с заформовкой» (Shape Melting) [11]. Как уже отмечалось, в корпорации Rolls-Royce (Великобритания) проводятся работы по применению дуговой сварки в качестве технологии, обеспечивающей высокую производительность формовки и снижение уровня отходов, которые могут возникнуть при традиционной обработке в процессе изготовления изделий из дорогих сплавов [12]. В настоящее время в данной корпорации успешно внедряют эту технологию для производства различных частей самолетов из дорогостоящих сплавов на основе никеля и титана.

Кроме вышеперечисленных примеров, научно-исследовательская работа по трехмерной дуговой сварке ведется в университете Ноттингема, (Великобритания), университете Вуллонгонга (Австралия) и Южном методистском университете в Далласе (США, штат Техас) [13]. Группы исследователей из Индийского Института технологий (Бомбей, Индия) и Института технологии производства и автоматизации Фраунгофера представили свои концептуальные идеи объединения сварки с фрезерованием (combining a welding operation with milling). Исследовались также характерные дефекты формирования объемных изделий сварочными способами и разрабатывались пути их устранения [14]. Была показана необходимость контроля температуры наращиваемых слоев. Особое внимание обращалось на создание изделий из титановых [15] и никелевых [16] сплавов для задач аэрокосмической отрасли. В целом, основные сварочные и родственные технологии для аддитивного производства можно представить в виде табл. 2 [17].

В ИЭС им. Е. О. Патона также была подтверждена принципиальная возможность формирования крупногабаритных объемных конструкций с помощью дуговой сварки. Одним из ярких примеров может служить создание Г. Дочкиным объемных сварных скульптур и картин из титанового сплава по собственному уникальному методу, разработанному в середине 1970-х годов [18]. Решались также отдельные производственные задачи, связанные с изготовлением уникальных изделий оборонной промышленности.

В упомянутых работах в основном изучались возможности применения для трехмерной печат

3D аддитивные технологии

Таблица 2. Основные технологии аддитивного производства, использующие процессы локального плавления [17]

	Напыление				Порошок/Изложница		
	Плазма (проволока)	Электронный луч (проволока)	Лазер (проволока)	Лазер (порошок)	Лазер (порошок)	Электронный луч (порошок)	Связующее (порошок)
Схема процесса							
Иллюстрация							
Описание	Свободное напыление проволоки с использованием дуговой плазмы	Напыление проволоки, расплавленной при помощи лазерного или электронного луча в камере	Осаждение порошка, расплавляемого с помощью лазера в камере	Лазерное или электронно-лучевое селективное плавление в изложнице, находящейся в камере		Система порошок/связующее, требующая расплавления в нижнем положении	
Применение	<p>Высокоскоростное расплавление материала и технология его нанесения позволяют выращивать почти точные изделия</p>			<p>Точные и почти чистые наплавленные части</p>	<p>Призматические компоненты нового поколения с высокой геометрической сложностью</p>		<p>Детали сложной формы с внутренними полостями для автомобилей</p>

ти таких сварочных процессов, как дуговая сварка плавящимся электродом в среде защитного газа (GMAW) и дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе (GTAW). Эти процессы обеспечивают хорошее металлургическое сцепление, а также защиту сварочной ванны и наращиваемых слоев изделий от образования оксидов. Однако эти процессы при их доступности также обладают такими недостатками, как значительный размер зоны термического влияния (ЗТВ) и достаточно большие размеры наращиваемого слоя, что приводит к возникновению нежелательных температурных градиентов и накоплению остаточных напряжений. Кроме этого, в качестве расходного материала для формирования объемных изделий используется преимущественно обычная сварочная проволока, что ограничивает химический состав и свойства этих изделий.

Устранить указанные недостатки можно применяя способы микроплазменного или плазменно-дугового плавления (plasma-arc melting – PAM), а также микроплазменной или плазменно-дуговой сварки (plasma-arc welding – PAW). Эти сварочные технологии способны обеспечить новый уровень трехмерной печати как по сравнению с процессами дуговой сварки (GMAW, GTAW), так и по сравнению с лазерным селективным спеканием (SLM), ввиду следующих достоинств:

температура в факеле плазменной дуги может достигать 30000 °С, что существенно больше, чем в обычной электрической дуге, поэтому плазма может расплавить практически любой тугоплав-

кий материал для послойного наращивания объемных изделий;

минимальный нагрев ранее нанесенных слоев при формировании изделий, проникновение тепла в основной металл менее 5 %;

отсутствие разбрызгивания металла при наращивании слоев, чрезвычайно низкое их перемешивание;

возможность регулирования в широких пределах толщины (0,5...5,0 мм) и ширины (1,5...50,0 мм) наносимого слоя металла при аддитивном наращивании объемных изделий;

возможность регулирования состава газовой среды (восстановительной, инертной, окислительной) в процессе аддитивного наращивания слоев при формировании изделия;

более высокая экономичность и производительность процесса (в 2...3 раза и более);

возможность использования широкой номенклатуры расходных материалов (порошки металлов, сплавов, композиционных материалов, порошковые смеси, сплошные и порошковые проволоки), в том числе из сплавов на основе Fe, Ni, Co, Cu, Ti, Al, а также из композитных материалов, содержащих тугоплавкие компоненты — карбиды, бориды и другие (например, WC, Cr₃C₂, TiC, TiB₂) тугоплавкие материалы, композиционные материалы с тугоплавкими компонентами;

возможность изменения состава металла в процессе формирования изделий, получение изделий из материалов с градиентной структурой.

В настоящее время в передовых исследовательских институтах и промышленных корпора-

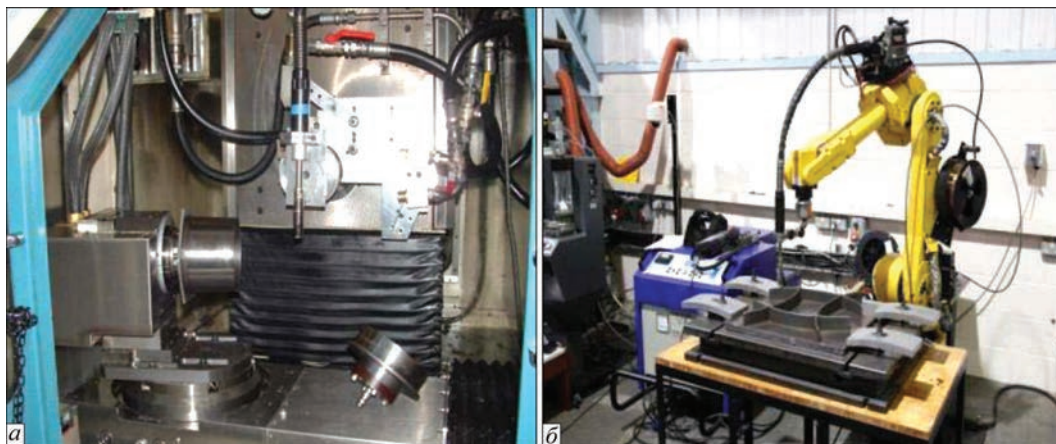


Рис. 1. Комплексы для реализации сварочных аддитивных технологий [9]: *a* – пятиосная система с ЧПУ-фрезерованием и технологией WAAM; *б* – процесс WAAM без механической обработки, реализуемый при помощи антропоморфного робота

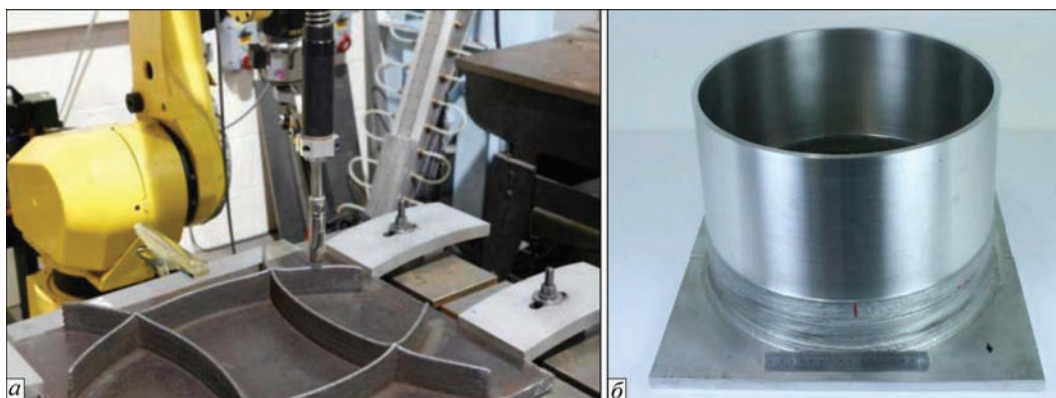


Рис. 2. Примеры объемных изделий из углеродистой стали S355, полученных по технологии WAAM [9]: *a* – панели с пересекающимися ребрами без механической обработки; *б* – цилиндр, механически обрабатываемый после изготовления

в странах экономически развитых стран ведутся научно-практические исследования по разработке технологий PAM и PAW, а также других сварочных технологий трехмерной печати металлических изделий. Рассмотрим некоторые характерные примеры таких работ.

В университете Кренфилда (Великобритания) разработаны различные комплексы для реализации сварочных аддитивных технологий – как с механической обработкой в процессе наращивания слоев, так и без таковой (рис. 1) [9]. В основе изготовления объемных изделий на этих комплексах лежит технология WAAM (Wire + Arc Additive Manufacture) проволоочно-дугового аддитивного производства (рис. 2). Изделия изготавливаются из различных материалов, например, углеродистой стали, титановых и алюминиевых сплавов и др. При этом может использоваться как обычная (непрерывная или импульсная), так и сжатая электрическая дуга, т. е. плазма (рис. 3). Одним из перспективных направлений использования технологии WAAM является изготовление габаритных сотовых конструкций (рис. 4).

В Южном методистском университете в Далласе (штат Техас, США) были рассмотрены варианты лазерной, дуговой и плазменно-дуговой технологий изготовления трехмерных объектов

с одновременной либо финишной механической обработкой (ЧПУ-фрезерованием) [13]. Были разработаны соответствующие технологические комплексы, а также предложен ряд технических решений, позволяющих изготавливать как относительно простые, так и достаточно сложные изделия (рис. 5). В том числе были проведены исследования в области микроплазменно-



Рис. 3. Корпуса снарядов диаметром 160 и длиной 800 мм с толщиной стенки 8...18 мм массой 32 кг из высокопрочной стали, изготавливаемые по технологии WAAM импульсной MIG-сваркой с производительностью 4 кг/ч, до (*a*) и после (*б*) механической обработки [9]

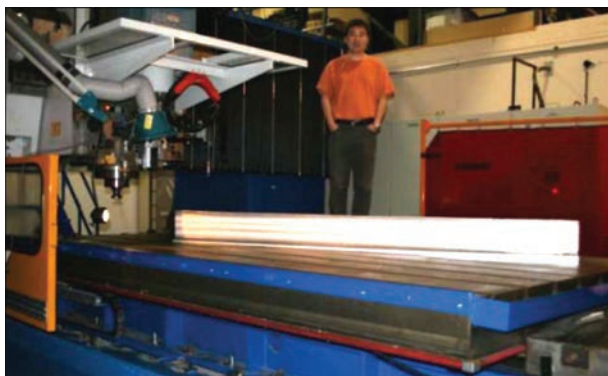


Рис. 4. Алюминиевая сотовая балочная конструкция повышенной жесткости длиной 3 м [9]

го порошкового выращивания объемных изделий (рис. 6). Показана принципиальная возможность получения градиентных композитных структур таким способом. Анализ особенностей и перспектив указанных сварочных технологий показал, что для наиболее высокопроизводительного и экономичного создания качественных объемных изделий с толщиной стенки 3,0...50,0 мм оптимальным является использование плазменно-дуговой порошковой наплавки слоев высотой 0,5...5,0 мм за один проход.

Помимо изделий машин и механизмов, сварочные технологии трехмерной печати позволяют создавать и строительные конструкции. Примером может служить создание новой технологии MX3D [19]. Проект MX3D создан лабораторией JORIS LAARMAN LAB в сотрудничестве с ACOTECH и HAL (Голландия). Новая технология имеет огромные перспективы, поскольку позволяет быстро создавать сложные металлические сооружения без возведения каких-либо сопутствующих поддерживающих конструкций, например, лесов или временных промежуточных опор. В процессе трехмерной сварки MX3D человек или

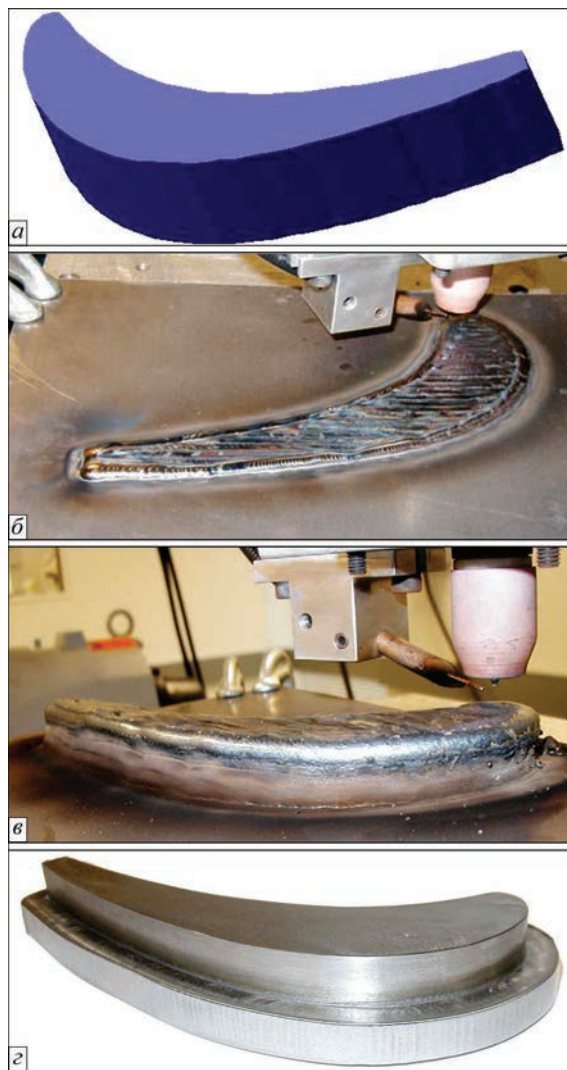


Рис. 5. Процесс изготовления лопатки турбины при помощи сочетания дуговой наплавки и ЧПУ-фрезерования: *a* – CAD-модель; *б* – начало TIG-наплавки; *в* – окончание TIG-наплавки; *г* – заготовка после ЧПУ-фрезерования [13]

сварочный робот сам строит себе опору и двигается вперед по возводимой конструкции. Это уско-

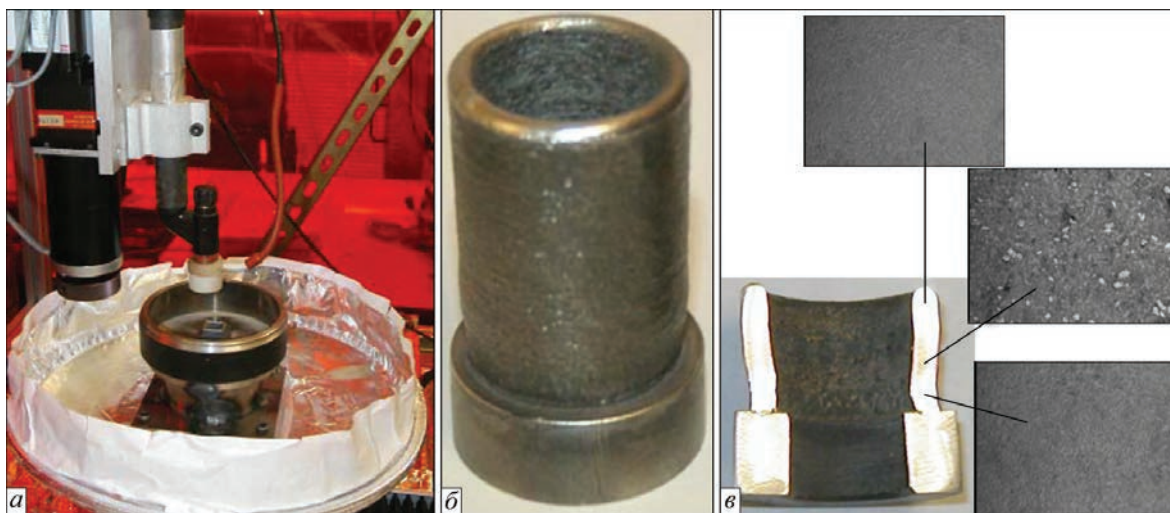


Рис. 6. Микроплазменное порошковое выращивание объемных изделий [13]: *a* – лабораторная установка; *б* – полый однородный цилиндр (инструментальная сталь H-13); *в* – создание градиентной композитной структуры (инструментальная сталь H-13 + карбид вольфрама)

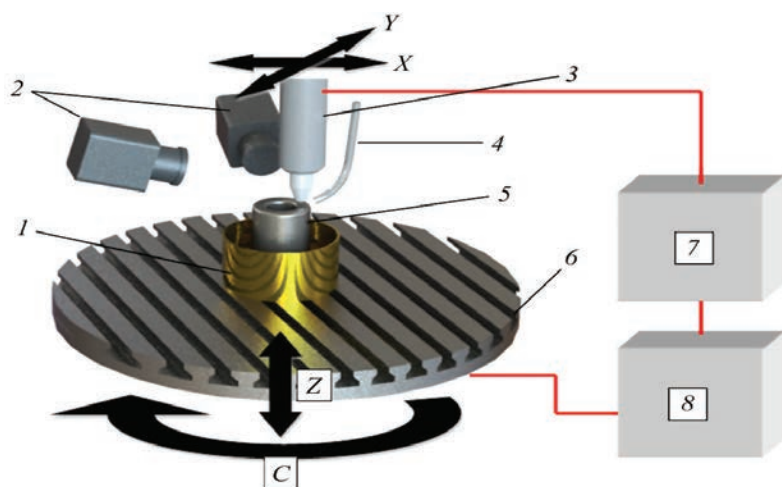


Рис. 7. Схема установки для плазменно-дуговой трехмерной печати объемных изделий (обозначения см. в тексте)

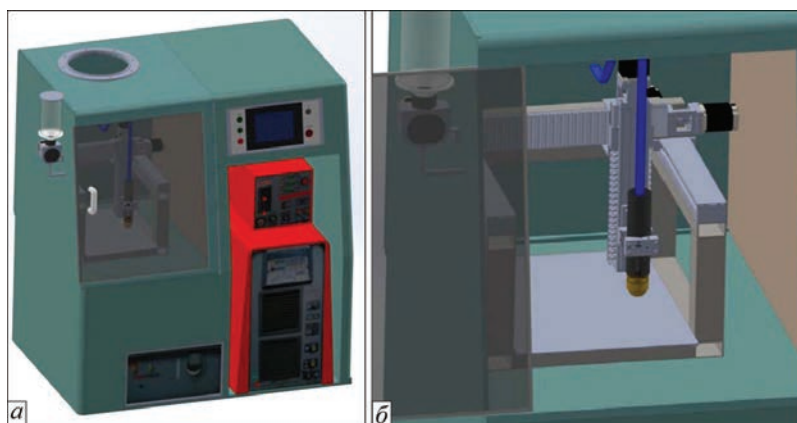


Рис. 8. Спроектированный в ИЭС им. Е. О. Патона комплекс для изготовления трехмерных объектов на основе технологий плазменно-дуговой сварки и наплавки: а — общий вид; б — трехкоординатный манипулятор с плазмотроном

рует и упрощает строительство, к тому же МХ3D может быть полностью роботизирован и работать круглосуточно.

Обобщение данных, приведенных в проанализированных работах, позволяет предложить следующий подход к изготовлению объемных изделий с помощью сварочных технологий: компьютерное моделирование изделия, его изготовление при помощи плазменно-дуговой технологии с использованием проволоки или порошка в условиях контроля температуры и формообразования, механическая обработка минимально необходимого количества участков изделия. Для реализации такого подхода целесообразно отдельно использовать установку для плазменно-дуговой трехмерной печати (рис. 7) и отдельно проводить механическую обработку на фрезерном и/или токарном станке с ЧПУ. Объединять процессы трехмерной печати и финишной механической обработки в рамках одной многоосевой универсальной установки, по нашему мнению, не целесообразно.

После создания компьютерной модели выращиваемой детали (при помощи системы автоматизированного проектирования САД, например

Solidworks) ее автоматически (при помощи системы САМ, например Lazy CAM, Art CAM) разделяют на слои с получением для каждого из слоев управляющих программ, загружаемых в систему ЧПУ комплекса (рис. 7). Выращивание детали 5 производят в экранированной (для улавливания сварочных брызг и неиспользованного порошка) зоне 1, расположенной на поворотном столе 6, имеющем возможность вращения C и пошагово вертикального перемещения Z . Плазмотрон прямого действия 3 установлен на каретке двухкоординатного манипулятора, обеспечивающего точное перемещение по координатам X и Y . В зону действия плазмотрона 3 при помощи системы 4 подается присадочная проволока или порошок. Наблюдение за процессом ведется при помощи системы 2, включающей две ССD-камеры, расположенные под 90° друг к другу, и тепловизор. При этом контролируется не только формообразование детали 5, но и ее температурное состояние. Системы 4 и 2 также расположены на каретке. Электрическое питание плазмотрона 3 обеспечивается источником 7, а управление процессом трехмерной печати — системой ЧПУ 8. По окончании выращивания детали 5 ее

могут передавать на пост механической обработки, обрабатывать непосредственно на той же установке, на которой ее создали, либо оставлять необработанной, при условии получения требуемого качества ее поверхностей.

В настоящее время в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины ведется изготовление оборудования для создания трехмерных объектов на основе технологий плазменно-дуговой сварки и наплавки. Для этого спроектирован комплекс на базе трехкоординатного манипулятора, оснащенный плазмотроном с источником питания, дозатором присадочного порошка и системой ЧПУ (рис. 8). Управление комплексом осуществляется при помощи общего контроллера с возможностью обмена данными по режимам трехмерной печати и управляющими командами с компьютером. Проводимые работы позволят создать ряд унифицированного оборудования различных типоразмеров для трехмерной печати металлических объемных изделий сложной формы на основе плазменно-дуговых технологий.

Выводы

1. Использование сварочных технологий для получения металлических объемных изделий позволяет значительно снизить себестоимость их изготовления при одновременном повышении производительности по сравнению с SLS- и SLM-процессами.

2. Наиболее перспективной сварочной технологией трехмерной печати является плазменно-дуговая с применением проволок или порошков. Она позволяет при сравнительно малом тепловложении создавать качественные объемные изделия с толщиной стенки 3,0...50,0 мм из сплавов на основе Fe, Ni, Co, Cu, Ti, Al, а также композитных материалов, содержащих тугоплавкие компоненты.

3. Применение сварочных технологий позволяет получать как сравнительно небольшие, так и длинномерные изделия, не нуждающиеся в финишной механической обработке (например, вырабатывать ребра жесткости на крупногабаритных панелях, создавать сотовые панели, строительные конструкции и т. д.).

4. Сочетание сварочных технологий трехмерной печати с сопутствующей или финишной механической обработкой (чаще всего ЧПУ-фрезерованием) позволяет изготавливать готовые к применению сложнопрофильные металлические изделия.

1. Kruth J. P. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping / J. P. Kruth, M. C. Leu, T. Nakagawa // CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 1998. – № 47(2). – P. 525–540.
2. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок: монография; под ред. В. Я. Панченко: разд. Лазерные технологии быстрого прототипирования и прямой фабрикации трехмерных объектов. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.
3. Слюсар В. И. Фаббер-технологии. Новое средство трехмерного моделирования / В. И. Слюсар // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2003. – № 5. – С. 54–60.
4. Deckard C. R. Recent advances in selective laser sintering / C. R. Deckard, J. J. Beaman // Proceedings of the 14th Conference on Production Research and Technology, Michigan, 1987. – P. 447–451.
5. Каблов Е. Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы / Е. Н. Каблов // Интеллект&Технологии. – №2 (11). – 2015. – С. 52–55.
6. Madigan R. Bruce. Measurement and simulation of titanium alloy deposit temperature in electron beam additive manufacturing / Madigan R. Bruce, Sean F. Riley, Mark J.

- Cola [et al.] // Trends in Welding Research 2012: Proceedings of the 9th International Conference, Chicago, Illinois, USA, June 4–8, 2012. – P. 963–969.
7. Kruth J. P. Selective laser melting of iron-based powder / J. P. Kruth // J. Mater. Process. Technol. – 2004. – V. 149. – P. 616–622.
 8. Karunakaran K. P. Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing / K. P. Karunakaran, S. Suryakumar, Vishal Pushpa, Sreenathbabu Akula // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – October 2010. – V. 26(5). – P. 490–499.
 9. Colegrove P. High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology [Электронный ресурс] / P. Colegrove, S. Williams // Cranfield University, 2013. – Режим доступа: <https://xyzist.com/wp-content/uploads/2013/12/Paul-Colegrove-Cranfield-Additive-manufacturing.pdf>
 10. Venuvinod P. K. Rapid prototyping: laser-based and other technologies / Patri K. Venuvinod, Weiyin Ma // Springer Science+Buisness Media, LLC, New York, 2004. – 389 p.
 11. Pat. № EP0340939A1 (US4857694): Cooling workpieces being manufactured by shape melting / T. E. Doyle, P. M. Ryan // The Babcock & Wilcox Company. – В 23 К 9/04, В 23 К 37/003, В 23 К 37/00F; 8.11.1989.
 12. Martina F. Investigation of methods to manipulate geometry, microstructure and mechanical properties in titanium large scale wire+arc additive manufacturing / F. Martina // School of Aerospace, Transport and Manufacturing, Cranfield University, UK, 2014. – 178 p.
 13. Kovacevic R. Development of machine for rapid manufacturing/repair [Электронный ресурс] / R. Kovacevic // The 2003 CTMA Symposium, March 31–April 3, Salt Lake City, USA, 2003. – Режим доступа: www.engr.smu.edu/rcam
 14. Abdullah F. Alhuzaim. Investigation in the use of plasma arc welding and alternative feedstock delivery method in additive manufacture / Abdullah F. Alhuzaim // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science General Engineering, Montana Tech of the University of Motana, 2014. – 228 p.
 15. Baufeld B. Additive manufacturing of Ti–6Al–4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties / Bernd Baufeld, Omer Van der Biest, Rosemary S. Gault // Materials & Design. – 2010. – V. 31. – P. 106–111.
 16. Clark D. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications / D. Clark, M. R. Bache, M. T. Whittaker // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – V. 203. – P. 439–448.
 17. Chad H. Metallic additive manufacturing: Comprehensive Overview and Findings on 3D Printing for Construction, CMIC 2014, Sept. 2014. – [Электронный ресурс]. – / Henry Chad: Режим доступа: <https://www2.iceaustralia.com/ei/images/cm14/cm14presentations/plenary/henry.pdf>.
 18. Искусство Григория Дочкина // CWELD – оборудование и материалы для сварки и резки: новости, 1.08.2015. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://adiosgroup.ru/?p=242>.
 19. 3D-сварка от MX3D распечатает мост над водой: новости, 17/06/2015. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://weldworld.ru/news/razrabotka/5583-3d-svarka-ot-mx3d-raspechataet-most-nad-vodoy.html>.

Поступила в редакцию 22.03.2016

Конференция ММITWRP-2016

Восьмая международная конференция «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» (ММITWRP-2016) 19–23 сентября 2016 г., отель «Курортный», г. Одесса, Украина

Первое информационное сообщение: <http://pwi-scientists.com/rus/mmi2016>

Архив трудов конференции: <http://patonpublishinghouse.com/rus/proceedings>