

Узагальнено досвід застосування зварювальних дугових технологій для виготовлення великогабаритних об'ємних деталей з різних типів сталей і сплавів. Показана можливість досягнення при цьому істотної економії (до 5 разів) дорогих сплавів. Обґрунтовано переваги застосування плазмово-дугових технологій для 3D-друку. Описано зразок промислового 3D-принтера для вирощування металевих виробів розмірами до 900×900×900 мм із застосуванням порошкового мікроплазмового та плазмового наплавлення

Ключові слова: 3D друк, адитивне виробництво, зварювальні технології, тривимірні металеві вироби

Обобщен опыт применения сварочных дуговых технологий для изготовления крупногабаритных объемных деталей из различных типов сталей и сплавов. Показана возможность достижения при этом существенной экономии (до 5 раз) дорогостоящих сплавов. Обоснованы преимущества применения плазменно-дуговых технологий для 3D-печати. Описан образец промышленного 3D-принтера для выращивания металлических изделий размерами до 900×900×900 мм с применением порошковой микроплазменной и плазменной наплавки

Ключевые слова: 3D печать, аддитивное производство, сварочные технологии, трехмерные металлические изделия

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ АДДИТИВНЫХ СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

С. И. Пелешенко

Инженер

Институт машиностроения и автостроения
Южно-Китайский технологический университет
ул. Вушан, 381, г. Гуанчжоу, р-н Тяньхе,
пров. Гуандун, Китай, 510640
E-mail: sviatoslav@qq.com

В. Н. Коржик

Доктор технических наук, руководитель отдела*
E-mail: vnkorzhyk@gmail.com

А. Н. Войтенко

Аспирант, инженер*
E-mail: vojtenko.kpi@gmail.com

В. Ю. Хаскин

Доктор технических наук
Отдел специализированной высоковольтной
техники и лазерной сварки**
E-mail: khaskin@ukr.net

В. И. Ткачук

Аспирант*
E-mail: tkachuk.pewi@gmail.com

*Отдел электротермических процессов обработки материалов**

**Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
ул. Боженко, 11, г. Киев, Украина, 03680

1. Введение

В настоящее время наблюдается огромный интерес к процессам аддитивного производства (технологиям 3D-печати). Ожидается, что применение этих процессов принципиально изменит промышленное производство. Основой этого служат: реализация автоматического проектирования деталей, гибкость и быстрота изготовления, перераспределение производства от больших предприятий к мелким, изготовление деталей непосредственно у потребителя [1]. Технологии 3D-печати позволяют «выращивать» изделия любой сложности с минимальными затратами. При этом практически отсутствуют отходы производства и сокращается количество обслуживающего персонала. Кроме преимуществ по скорости и стоимости изготовления изделий, эти технологии имеют достоинство с точки зрения охраны окружающей среды.

Они, в частности, снижают выделения парниковых газов и «тепловое» загрязнение. Аддитивные технологии имеют огромный потенциал в деле снижения энергетических и материальных затрат на создание самых разнообразных видов продукции. И наконец, степень использования 3D-технологий в промышленном производстве является индикатором реальной индустриальной мощи государства, индикатором его инновационного развития.

Различные процессы трехмерной печати объединяет то, что прототип изготавливается путем послойного (аддитивного) 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 этапов технологических процессов, специальном оборудовании для обработки

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

В настоящее время широко применяются такие процессы трехмерной печати, как стереолитография [1, 2] и струйное наращивание термопластичного полимерного материала (Fused Deposition Modeling – FDM) [3, 4]. Недостатком таких процессов является применение пластика в качестве основного конструкционного или связующего материала. Это значительно ограничивает номенклатуру изготавливаемых изделий по температуре эксплуатации, нагрузкам, механической прочности и другим показателям.

Поэтому, для расширения возможностей трехмерной печати требуется наличие технологий получения высокопрочных объемных изделий из металлов, сплавов, в том числе с высокой твердостью [3, 4]. Использование таких материалов даст возможность получения готовой продукции. Поэтому актуальным является создание технологий аддитивного производства готовых металлических объемных изделий. К таким технологиям, в первую очередь, относятся сварочные процессы (например, наплавка).

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В табл. 1 представлена классификация широко применяемых в настоящее время аддитивных технологий выращивания трехмерных объектов порошковыми и проволочными методами [4–6].

Таблица 1

Основные методы аддитивного производства

Метод	Технология	Используемые материалы
Экструзионный	Моделирование методом послойного наплавления (FDM или FFF)	Термопластики (такие как полилактид (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) и др.)
Проволочный	Производство произвольных форм электронно-лучевым плавлением (EBF ₃)	Практически любые металлические сплавы
Порошковый	Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)	Практически любые металлические сплавы
	Электронно-лучевое плавление (EBM)	Титановые сплавы
	Избирательное лазерное плавление (SLM)	Титановые сплавы, кобальт-хромовые сплавы, нержавеющая сталь, алюминий
	Избирательное горячее спекание (SHS)	Порошковые термопластики
	Избирательное лазерное спекание (SLS)	Термопластики, металлические порошки, керамические порошки
Струйный	Струйная трехмерная печать (3DP)	Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси
Ламинирование	Изготовление объектов методом ламинирования (LOM)	Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка
Полимеризация	Стереолитография (SLA)	Фотополимеры
	Цифровая светодиодная проекция (DLP)	Фотополимеры

С точки зрения получения трехмерных металлических изделий наиболее высокого качества перспективными являются процессы избирательного лазерного плавления (Selective Laser Melting – SLM) и электронно-лучевое плавление (Electron-Beam Melting – EBM).

Процессы SLM в настоящее время получили весьма широкое распространение для изготовления высокопрочных объемных металлических изделий [5]. Данный процесс обеспечивает возможность получения изделий путем сплавления порошков различных металлов и сплавов лазерным излучением. Преимуществами являются высокая степень детализации элементов, высокая плотностью (до 99 %), а также точность порядка ± 5 мкм.

Вместе с тем, при всей его эффективности и гибкости, процесс SLM также обладает рядом ограничений, которые сужают его широкое применение (табл. 1):

- необходимость применения дорогостоящего и энергетически затратного оборудования с высокой стоимостью обслуживания, что обуславливает высокую себестоимость процесса трехмерной печати и приводит к высокой стоимости изготавливаемых изделий;

- относительно низкая производительность трехмерной печати (обычно для наиболее распространенных машин не более 10 см³/час 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.

В ряде научно-исследовательских центров США ведется разработка электронно-лучевого процесса изготовления металлических изделий произвольной формы (Electron beam freeform fabrication – EBF₃). Например, в центрах NASA's Langley Research Center (Houston) и Johnson Space Center (Hampton) [1]. При этом электронный пучок используется в качестве источника энергии для плавления подаваемой проволоки в вакуумной среде. Данная технология была продемонстрирована на алюминиевых и титановых сплавах, представляющих интерес для аэрокосмического использования [1]. Существует возможность использования сплавов на основе никеля и железа. Однако широкое применение данного процесса ограничивается необходимостью использования дорогостоящей и сложной в обслуживании вакуумной техники, что также приводит к повышенной себестоимости изготавливаемых металлических деталей.

Следует отметить, что в классификацию представленных в табл. 1 технологий не внесены аддитивные сварочные дуговые технологии. В работе [7] приводится следующая хронология попыток использования сварочных технологий для получения трехмерных металлических конструкций сложной формы методом послойного наращивания наплавленных слоев:

- 1926 г. – запатентовано «использование электрической дуги в качестве источника тепла для получения объемных объектов, напылением расплавленного металла в накладываемые слои»;

- 1971 г. – изготовление сосуда высокого давления с использованием сварки под флюсом (фирма Mitsubishi, Япония), электрошлаковую технологию и TIG для получения изделий с функционально-градиентными стенками;

- 1983 г. – в США использована Shape Welding (фигурная сварка или сварка с заформовкой) для изготовления

крупногабаритных изделий из высоколегированной стали (20MnMoNi₅) весом 79 тонн;

– 1993 г. – в США запатентована комбинированная технология наращивания материала с помощью сварки с фрезерованием на станках с ЧПУ (Shape Deposition Manufacturing – SDM);

– 1994–99 гг. – разработана технология Shaped Metal Deposition (SMD) 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 (Германия) и Thyssen (Германия), организовали изготовление крупногабаритных деталей простой геометрии, например, сосудов высокого давления весом до 500 тонн [8]. Компания The Babcock & Wilcox Company (США) применила процесс «плавления с заформовкой» (Shape Melting) для изготовления крупных металлических конструкций и изделий из аустенитных сталей [9]. Корпорацией Rolls-Royce (Великобритания) в настоящее время проводятся работы по применению дуговой сварки для повышения производительности формовки и снижения уровня отходов при изготовлении изделий из дорогостоящих сплавов [10]. Эта технология успешно внедрена для производства различных частей самолетов из сплавов на основе никеля и титана.

Кроме вышеперечисленных примеров, научно-исследовательская работа по трехмерной дуговой сварке ведется в University of Nottingham (Великобритания), Университете Wollongong (Австралия) и Southern Methodist University (США) [11]. Группы исследователей из Индийского Института Технологий (Бомбей, Индия) и Института Технологии Производства и Автоматизации Фраунгофера (Германия) представили свои концептуальные идеи объединения сварки с фрезерованием. Разрабатывались пути устранения характерных дефектов формирования объемных изделий сварочными способами [12]. Была показана необходимость контроля температуры наращиваемых слоев. Особое внимание обращалось на создание изделий из титановых [13] и никелевых [14] сплавов для задач аэрокосмической отрасли.

Таким образом, на сегодняшний день наблюдается повышение доли сварочных технологий в аддитивном производстве металлических объемных изделий. Это связано как с высокой производительностью сварки, так и с ее невысокой стоимостью. Поэтому интерес представляет детальное изучение особенностей и перспектив применения сварочных технологий для трехмерной печати металлических изделий.

3. Цель и задачи работы

Целью настоящей работы является выработка рекомендаций по выбору сварочных технологий для аддитивного производства объемных металлических изделий на основе анализа современного состояния и исследования тенденций промышленного применения 3D-технологий.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– анализ особенностей применения сварочных технологий получения трехмерных металлических конструкций сложной формы методом послойного наращивания наплавленных слоев с определением характерных достоинств и недостатков;

– определение основных преимуществ и недостатков аддитивных сварочных технологий, по сравнению с традиционными способами изготовления объемных металлических деталей;

– определение возможности экономии материалов и повышения качества металлических деталей, изготавливаемых с помощью аддитивных сварочных технологий, по сравнению с традиционными способами механического изготовления;

– определение характерных подходов к изготовлению промышленного оборудования для 3D-печати металлических изделий, в том числе с применением плазменно-дуговых сварочных технологий;

– разработка образца промышленного 3D-принтера и проведение с его помощью экспериментов для проверки перспективности применения аддитивных плазменно-дуговых технологий.

4. Материалы и методы исследований аддитивных сварочных технологий изготовления объемных изделий

4.1. Анализ материалов и сварочных технологий, используемых в настоящее время

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (ИЭС) была подтверждена принципиальная возможность формирования крупногабаритных объемных конструкций с помощью дуговой сварки. Одним из ярких примеров может служить создание объемных сварных скульптур и картин из титанового сплава по уникальному методу, разработанному в середине 1970-х годов [15]. Решались также отдельные производственные задачи, связанные с изготовлением уникальных изделий оборонной промышленности.

Перечень материалов и технологий, апробированных для получения объемных металлических изделий послойным аддитивным наращиванием с применением дуговой сварки, приведен в табл. 2 [16]. Аппаратно-структурная схема построения таких технологических процессов приведена на рис. 1, а ее реализация для технологии электродуговой сварки с плавящимся электродом (проволокой) – WAAM (Wire-Arc Additive Manufacturing) – приведена на рис. 2 [16].

Таблица 2

Материалы и процессы, опробованные для получения объемных металлических изделий послойным аддитивным наращиванием с применением дуговой сварки

Материалы	Процессы
– Низколегированная конструкционная сталь;	– TIG (DC и импульсный) – высокое качество;
– Высокопрочная сталь;	– TIG высокочастотная (DC и импульсный) – высокая точность, высокое качество;
– Нержавеющая сталь;	– Импульсный MIG – простота, экономическая эффективность;
– Никелевые жаропрочные сплавы;	– Cold Metal Transfer (CMT) – низкое тепло-вложение, высокая стабильность процесса;
– Алюминиевые сплавы;	– Tandem Pulsed MIG – высокая скорость наращивания;
– Титан, титановые сплавы;	– Плазма PTA – высокое качество, скорость, возможность гибко регулировать ширину наращиваемого слоя
– Медь, медные сплавы	

При помощи технологии проволочно-дугового аддитивного производства WAAM изготавливают объемные изделия из различных материалов, например, конструкционной низкоуглеродистой стали, титановых [17] и алюминиевых [18] сплавов и др. (рис. 3–6). Для реализации данной технологии было создано специализированное сварочное оборудование [19].

Аддитивные сварочные технологии являются одним из немногих процессов, позволяющим изготавливать объемные биметаллические детали сложной формы с внутренними ребрами жесткости. Например, полученные таким образом детали «конструкционная сталь – бронза Cu-3%Si» (рис. 7) достаточно затруднительно производить с помощью технологий литья, порошковой металлургии и т. п.

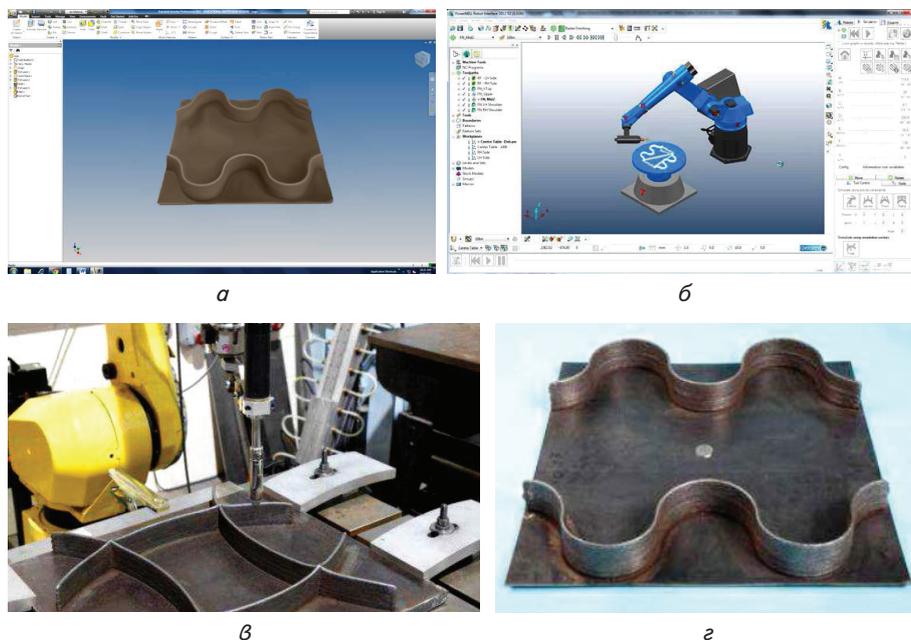


Рис. 2. Технологический процесс 3D печати объемных металлических изделий по методу Wire-Arc Additive Manufacturing [16]: а – компьютерное проектирование детали; б – программное обеспечение для 3-D позиционера или робота с интегрированным сварочным оборудованием; в – роботизированный комплекс со сварочной установкой; г – готовая деталь



Рис. 1. Принципиальная аппаратно-структурная схема процессов получения объемных металлических изделий послойным аддитивным наращиванием на основе сварочных технологий



Рис. 3. Примеры объемных изделий из углеродистой стали S355 [16]: а – панели с пересекающимися ребрами без механической обработки; б – деталь, механически обрабатываемая после изготовления

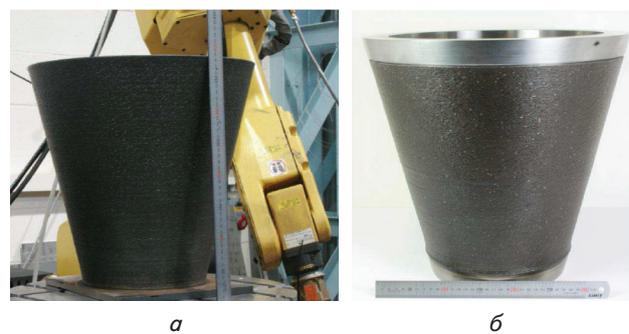


Рис. 4. Изготовление тонкостенных деталей конической формы из нержавеющей стали [16]: а – до механической обработки; б – в процессе механической обработки (высота деталей – 1 м, наибольший диаметр – 0,5 м)

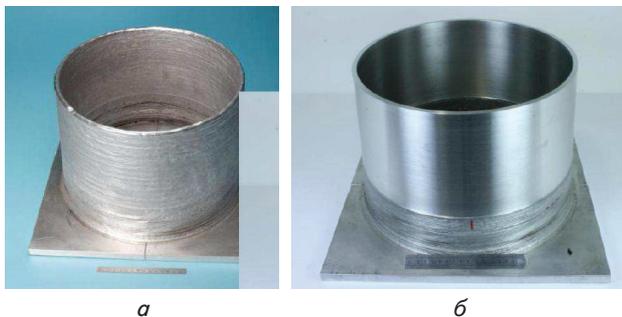


Рис. 5. Изготовление цилиндрической детали спутника из алюминиевых сплавов с переменной толщиной стенки (время изготовления – 6 часов) [16]: а – после послойного наращивания; б – после механической обработки

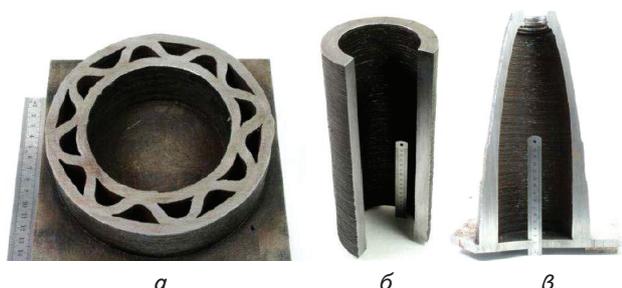


Рис. 6. Изготовление сложнопрофильных деталей с переменной толщиной стенки из высокопрочных сталей на примере корпуса снаряда (высота – 800 мм, диаметр – 160 мм, толщина стенки 18–8 мм, масса – 32 кг, производительность – 4 кг/час) [16]: а – начальный этап; б – цилиндрический участок; в – конический участок; г, д – готовые детали



Рис. 7. Объемная пустотелая деталь с внутренними ребрами жесткости из биметалла «конструкционная сталь – бронза Cu-3 %Si», полученная с помощью технологии электродуговой наплавки токоведущей проволокой [16]

Полученными таким образом изделие характеризуется достаточно высокими механическими свойствами:

- предел текучести – 140 МПа;
- предел прочности – 300 МПа;
- относительное удлинение – 12 %.

При механических испытаниях разрушение проходит по бронзе, а не по переходной зоне «сталь – бронза» [16].

Также одно из особо перспективных применений аддитивных сварочных дуговых технологий – получение объемных конструкций из титановых сплавов. Подтверждена возможность эффективного применения таких технологий для изготовления панелей сложной формы с ребрами жесткости из сплава Ti-6Al-4V (рис. 8) [20, 21].

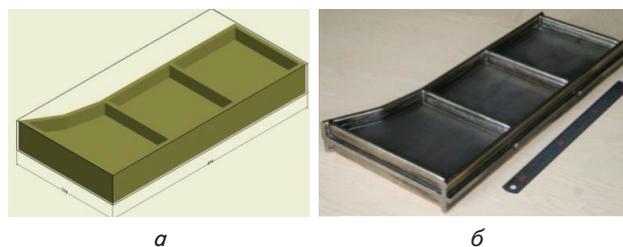


Рис. 8. Панели сложной формы с ребрами жесткости из сплава Ti-6Al-4V: а – объемная модель; б – панель, полученная аддитивной сварочной технологией Wire-Arc Additive Manufacturing

В частности, применение аддитивной технологии WAAM позволяет повышать экономию дорогостоящего титанового сплава при изготовлении объемных конструкций. Так, соотношение веса израсходованного материала к весу готовой детали для технологии WAAM составляет всего 1,1. При изготовлении аналогичной детали из листовых заготовок, получаемых резкой с последующей традиционной сваркой, этот показатель составляет 4,9 (табл. 3) [22]. При этом механические свойства получаемых деталей близки (табл. 4) [23]. По некоторым показателям детали, выполненные по технологии WAAM, превосходят полученные традиционным способом аналоги.

Таблица 3

Показатели экономии материала при 3D-печати объемных деталей из титанового сплава Ti-6Al-4V с применением сварочной технологии

Показатели			
Метод изготовления детали	Вес использованного сплава (кг)	Конечный вес готовой детали (кг)	Соотношение веса расходуемого материала к весу готовой детали
Традиционная механическая обработка заготовки (резка листовых заготовок + последующая сварка + финишная механическая обработка)	27,5	5,6	4,9
WAAM + финишная механическая обработка	5,0 (заготовка)+1,2 (проволока)=6,2	5,6	1,1

Таблица 4

Сравнительные механические характеристики объемных деталей из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученные с помощью аддитивной сварочной и традиционных технологий

Метод изготовления детали	Показатели			
	Предел текучести (МПа)	Предел прочности (МПа)	Удлинение (%)	Трещиностойкость (МПа*м ^{1/2})
Получение отливки + горячее изостатическое прессование (Cast and HIP) – стандарт AMS 4985	824	896	6,0	75,0
Ковка	950	1034	11,7	–
Послойное наращивание с применением дуговой сварки – WAAM	805–865	918–965	8,2–14,1	73,9

Также одним из перспективных направлений использования технологии WAAM является изготовление крупногабаритных длинномерных конструкций сложной формы из высокопрочных алюминиевых сплавов (рис. 9) [18].



Рис. 9. Изготовление алюминиевой конструкции крыла самолета [18]

Отметим, что в основе технологии WAAM лежат процессы сварки дугой с плавящимся электродом (MIG). При этом могут использоваться как режим импульсной модуляции сварочного тока (для случаев наплавки алюминиевых сплавов), так и непрерывный режим (для прочих случаев).

4. 2. Характерные примеры изготовления трехмерных объектов с помощью аддитивных сварочных технологий

В Южном Университете в Далласе (штат Техас, США) получены результаты, подтвердившие эффективность сочетания дуговой технологий изготовления трехмерных объектов с одновременной либо финишной механической обработкой (ЧПУ-фрезерованием) [10]. Предложен ряд технических решений, позволяющих изготавливать как относительно простые, так и достаточно сложные изделия, в том числе лопатки турбин из никелевых сплавов. В Cranfield University (Великобритания) разработан ряд промышленных комплексов для реализации аддитивных сварочных технологий – как с механической обработкой в процессе наращивания слоев, так и без таковой (рис. 10) [7].



а



б

Рис. 10. Комплексы для реализации сварочных аддитивных технологий [9]: а – на базе антропоморфного робота без механической обработки; б – 3-осевой комплекс с системой фрезерования

Сварочный 3D-принтер Value Arc MA5000-S1 (Япония) был изготовлен компанией Mutoh Industries Ltd. (Япония) в сотрудничестве с Институтом передовых механических систем Токийского университета [24]. В нем, в отличие от большинства других металлических 3D-принтеров, для распечатки объемных изделий из металла применяется технология электродуговой сварки токоведущей проволокой в среде защитного газа (GMAW). Применение такой технологии обеспечивают относительно невысокую стоимость установки Value Arc MA5000-S1 (Япония) и ее достаточно высокую производительность (свыше 500 см³/час). Данная установка имеет достаточно большой размер рабочего пространства (500×500×500 мм) и способна создавать объемные изделия из различных металлов, таких как сталь, титан, алюминий, сплавы никеля и др. (рис. 11).

Помимо рассмотренных электродуговых технологий для трехмерной печати металлических изделий в настоящее время изучается возможность применения плазменных сварочных технологий. В качестве примера можно привести результаты исследований, выполненных в Southern Methodist University (Техас, США) по изучению процесса выращивания объемных изделий методом микроплазменной порошковой послойной наплавки [10]. Показана принципиальная возможность получения градиентных композитных структур таким методом (рис. 12).

Помимо изделий машин и механизмов, сварочные технологии трехмерной печати позволяют создавать и крупногабаритные строительные металлические конструкции. Примером может служить создание новой аддитивной технологии, основанной на процессе электродуговой сварки с применением проволоки, получившим название MX3D (Голландия) [25]. Проект MX3D создан в лаборатории JORIS LAARMAN LAB (Амстердам, Голландия) в сотрудничестве с ACOTECH и HAL (Голландия). Такая 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 (рис. 13). В процессе трехмерной сварки МХ3Д человек или сварочный робот сам строит себе опору и двигается вперед по возводимой конструкции. Это ускоряет и упрощает строительство, к тому же МХ3Д может быть полностью роботизирован и работать круглосуточно.

В проанализированных работах, в основном, изучались возможности применения дуговых сварочных процессов для трехмерной печати. Рассматривалась дуговая сварка плавящимся электродом в среде защитного газа (GMAW) и дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитном газе (GTAW). Основными преимуществами этих процессов являются: сравнительно невысокая стоимость, доступность, обеспечение хорошего металлургического сцепления, а также защита сварочной ванны и наращиваемых слоев от образования оксидов. К недостаткам рассмотренных процессов относятся значительный размер зоны термического влияния (ЗТВ) и достаточно большие размеры наращиваемого слоя. Это приводит к возникновению нежелательных температурных градиентов и накоплению остаточных напряжений. Кроме этого, в качестве расходного (присадочного) материала для формирования объемных изделий используется преимущественно обычная сварочная проволока, что ограничивает химический состав и свойства этих изделий.

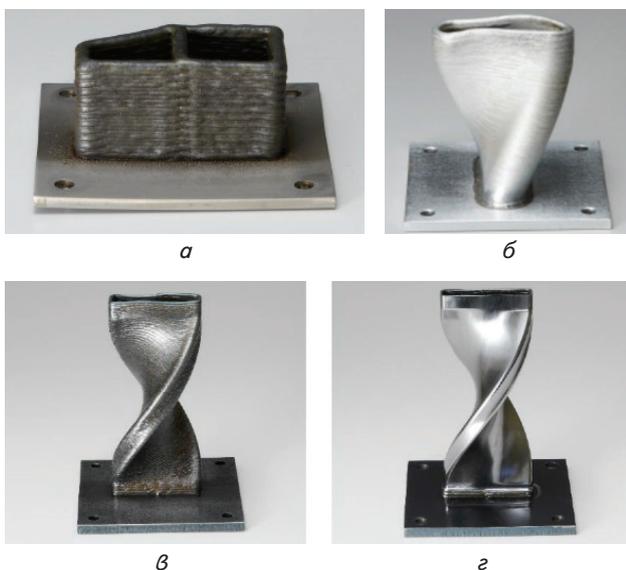


Рис. 11. Трехмерные изделия, изготовленные по технологии электродуговой сварки с помощью 3D-принтера Value Arc MA5000-S1 (Япония) [24]: а – деталь из углеродистой стали без механической обработки; б – алюминиевая деталь без механической обработки; в – титановая деталь без механической обработки; г – титановая деталь после механической обработки

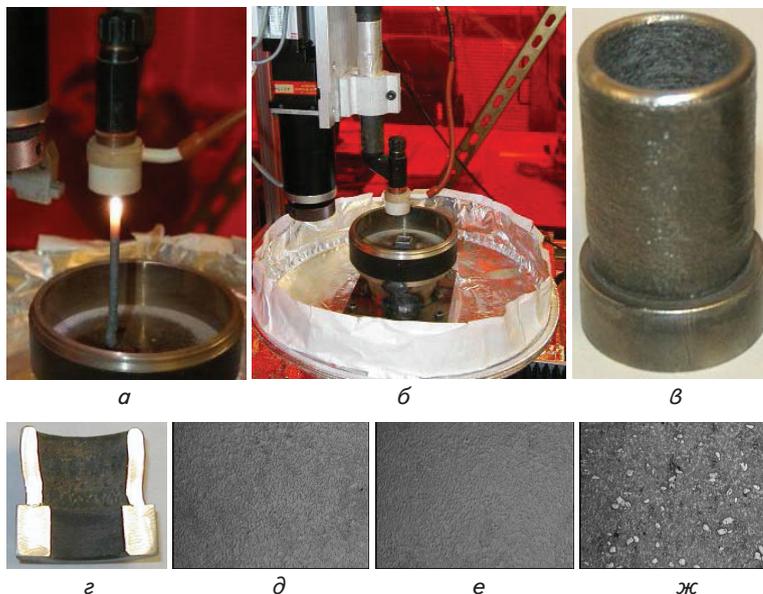


Рис. 12. Микроплазменное порошковое выращивание объемных изделий [10]: а – процесс выращивания; б – лабораторная установка; в – полый однородный цилиндр (инструментальная сталь Н-13); г – поперечное сечение полого цилиндра с градиентной композитной структурой (инструментальная сталь Н13 + карбид вольфрама); д – структура в верхней части цилиндра; е – структура в средней части; ж – структура в нижней части



Рис. 13. Процесс изготовления моста с помощью сварочного 3D-принтера [25]

Более широкими технологическими возможностями обладают плазменно-дуговые сварочные технологии (Plasma Transferred Arc Welding – РТА) [11]. Применение этих технологий для изготовления трехмерных металлических объектов вместо рассмотренных электродуговых сварочных процессов может уменьшить или устранить некоторые из указанных недостатков.

4. 3. Создание оборудования для разработки новых сварочных технологий изготовления объемных изделий

Для 3D-печати металлических деталей представляет интерес применение таких плазменно-дуговых сварочных технологий, в которых используется струя ламинарной плазмы [26]. Также целесообразно использовать известные технологии плазменной наплавки [27]. Для этого в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (г. Киев, Украина) в сотрудничестве с Южно-Китайским технологическим университетом (г. Гуанчжоу, КНР) было спроектировано соответствующее промышленное оборудование [28].

Для повышения конкурентоспособности создаваемого оборудования авторы отказались от использования дорогостоящих антропоморфных роботов. Вместо этого был разработан оригинальный недорогой и технологичный 3D-позиционер сменных плазменных сварочно-наплавочных головок в таких головках используются как порошки, так и проволоки. Техническими преимуществами данного оборудования (по сравнению со сварочным роботом) являются простота изготовления изделий больших размеров, а также повышенная точность.

На рис. 15–17 показано узлы созданного 3D-принтера, получившего название PLAZER 3D PW (изготовлен ООО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР «ПЛАЗЕР», Украина). Его источник питания рассчитан на реализацию аддитивных технологий порошковой микроплазменной (сварочный ток до 50 А) и плазменной (сварочный ток до 120 А) наплавки. Принтер включает 3D-позиционер оригинальной конструкции с рабочей зоной перемещения наплавочной головки 900×900×900 мм (рис. 15). Плазматрон способен работать в режимах постоянного и импульсного тока прямой полярности, режиме разнополярных импульсов и др. [29] (рис. 16). Управление позиционированием плазмотрона и подачей расходного порошка происходит при помощи системы ЧПУ, которая объединена с источником питания и пультом управления порошкового питателя (рис. 17). Управление 3D-принтером осуществляется при помощи общего PLC-контроллера с возможностью обмена данными по режимам трехмерной печати и управляющими командами с компьютером.

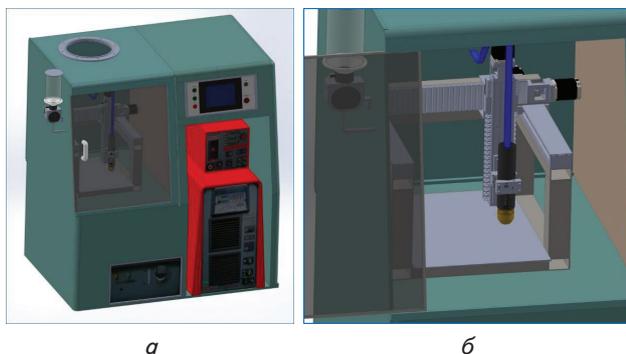


Рис. 14. Модель 3D-принтера PLAZER 3D PW для разработки новых плазменных технологий изготовления объемных изделий: а – общий вид; б – трехкоординатный позиционер плазмотрона

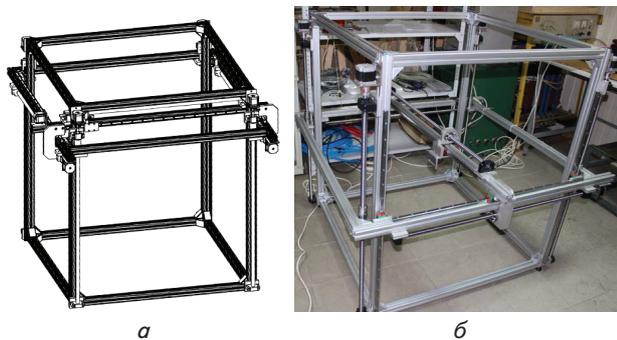


Рис. 15. Трехкоординатный позиционер установки PLAZER 3D PW: а – компьютерная 3D-модель; б – внешний вид

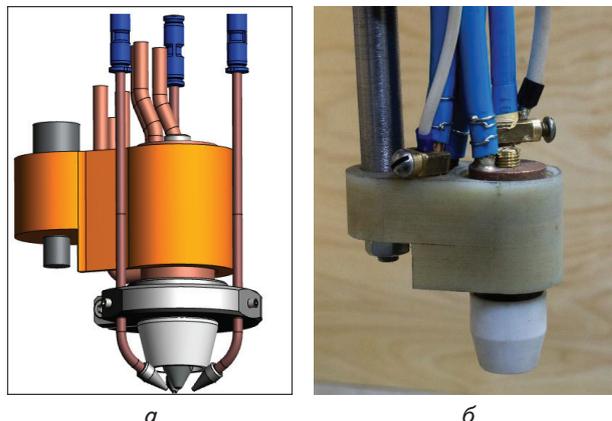


Рис. 16. Плазматрон для 3D-печати установки PLAZER 3D PW: а – компьютерная 3D-модель; б – внешний вид

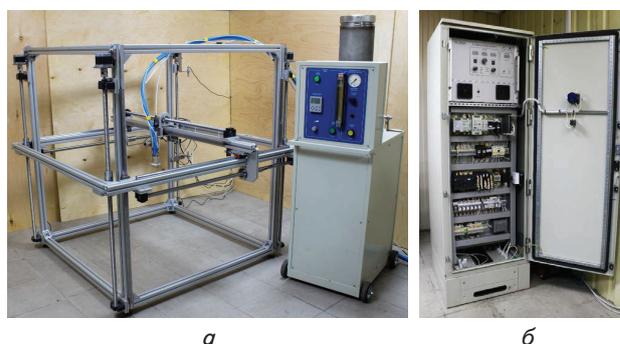


Рис. 17. Установка PLAZER 3D PW: а – манипулятор с плазматроном и порошковым дозатором-питателем; б – вид блока питания и управления с открытой лицевой панелью

С применением созданного 3D-принтера PLAZER 3D PW был проведен ряд экспериментов, позволивших разработать базовые технологические приемы аддитивного плазменно-дугового изготовления объемных металлических изделий. Разработанное оборудование и технология имеют следующие преимущества по сравнению с широко применяемыми процессами избирательного лазерного плавления SLM (табл. 5):

- производительность по наращиваемому металлу для одинаковой потребляемой мощности выше на 1–2 порядка, при этом удельная стоимость оборудования (1 кВт) ниже в 3–10 раз;
- возможность значительного (в 10 и более раз) увеличения габаритных размеров создаваемых деталей;
- возможность увеличения количества степеней свободы инструмента;
- возможность гибкой переналадки для использования порошковых и проволочных расходных материалов;
- более широкая номенклатура применяемых расходных материалов для 3D печати (порошки, проволоки, композиционные материалы);
- большой коэффициент использования присадочно-го материала (выше на 20–50 %).

Также необходимо отметить, что механическая прочность изделий, полученных с помощью аддитивных сварочных плазменно-дуговых технологий, составляет преимущественно 90...95 % от прочности литого металла, что не всегда достигается SLM-процессом.

Сравнение основных технико-экономических показателей SLM-технологий трехмерной печати металлических изделий с разработанной аддитивной плазменно-дуговой технологией

Показатели	Технологии трехмерной печати металлических изделий			
	SLM (фирма LENS)	SLM (фирма POM)	SLM (фирма AeroMet)	Аддитивная плазменно-дуговая технология (3D-принтер PLAZER 3D PW)
Характеристики используемого оборудования	Лазер Nd:YAG, мощность 1 кВт	Лазер CO ₂ , мощность 2 кВт	Лазер CO ₂ , мощность 14 кВт	На основе сварки, мощность 2–20 кВт
Производительность по наращиваемому металлу (см ³ /час)	8	8	160	>500–5000
Возможность обработки по осям (степеням свободы)	3 оси	3 оси	3 оси	4–5 осей
Максимальные размеры выращиваемых деталей	100 мм	200 мм	350 мм	900 мм и более
Тип используемого материала для 3D-печати	Металлический порошок	Металлический порошок	Металлический порошок	Порошки металлов, сплавов, композиционных материалов, смеси порошков. Проволока – сплошная и порошковая
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 крупногабаритных объемных изделий различного назначения
Ориентировочная стоимость основных единиц оборудования	Стоимость лазера: \$80,000...\$120,000 за 1 кВт мощности			Стоимость сварочного оборудования: \$1000...\$5000 за 1 кВт мощности

5. Результаты исследований современного состояния аддитивных сварочных технологий изготовления объемных изделий

Как показал анализ литературных источников, качество объемных изделий, получаемых при помощи плазменных технологий, выше качества аналогичных изделий, получаемых при помощи аддитивных электродуговых сварочных процессов (например, WAAM) [11]. Однако оно уступает качеству изделий, получаемых избирательным лазерным плавлением, по показателям точности геометрических размеров и шероховатости поверхности. Эта проблема может быть решена путем объединения технологии плазменной наплавки с ЧПУ-фрезерованием (CNC-Milling). Формирование точной геометрической формы изделия и финишная обработка при этом выполняются при помощи единых программного обеспечения и системы управления. Как было описано выше, этот подход успешно реализован в процессах 3D печати с применением технологий электродуговой сварки. Необходимо отметить, что в подавляющем большинстве случаев трехмерные детали, полученные избирательным лазерным плавлением, также подвергаются доводке по размерам и финишной обработке. Поэтому разница в затратах на окончательную механическую обработку объемных деталей, выполненных аддитивной плазменной наплавкой и способом SLM, не является существенной для показателя себестоимости.

На базе разработанного в ИЭС оборудования (рис. 14–17) в настоящее время ведется разработка линии 3D-принтеров для печати металлических изделий сложной формы с увеличенными размерами рабочей зоны (от 900 мм до нескольких метров). В таком обо-

рудовании предусматривается применение не только плазменной или микроплазменной порошковой наплавки, а также комбинации плазменных и электродуговых сварочных головок. Например, рассматривается возможность использования гибридных процессов, объединяющих технологии плазменной сварки с дуговой сваркой токоведущей проволокой [30]. Перспективность такого подхода основана на преимуществах плазменных технологий при сварке и наплавке алюминиевых и других трудносвариваемых сплавов [31]. Применение гибридного оборудования представляет интерес для изготовления крупногабаритных трехмерных деталей, при котором требуется повышение производительности при сохранении высоких механических характеристик.

Преимущества дуговой плазмы перед обычной электрической дугой заключаются в более высокой температуре, степени концентрации энергии и меньшей ширине источника нагрева [32]. Соответственно, плазменная наплавка позволяет аддитивно наращивать более узкие слои при более низком нагреве изделия в процессе его выращивания. Кроме того, для дополнительной минимизации термического воздействия возможно применение плазмотронов косвенного действия. При этом производительность плазменных технологий не уступает электродуговому. Следовательно, для аддитивного производства объемных металлических деталей применение плазменных сварочных (наплавочных) технологий позволяет уменьшить характерные недостатки дуговой сварки.

В ИЭС имеется многолетний опыт применения плазменных технологий для получения сварных соединений и наплавленных слоев металла (например, [32–34]). Этот опыт показывает, что такие технологии способны обеспечить новый уровень показателей трехмерной печати

и свойств полученных изделий по сравнению с рассмотренными методами дуговой сварки (WAAM, МХЗД, GMAW, GTAW и др.). Можно выделить следующие достоинства сварочных (наплавочных) плазменно-дуговых технологий:

- температура в факеле плазменной дуги может достигать до 30000 °С, что в пять-шесть раз больше чем в обычной электрической дуге, поэтому плазма может расплавить практически любой тугоплавкий материал для послойного наращивания объемных изделий;
- цилиндрическая форма дуги (в отличие от обычной конической);
- повышенное давление дуги на металл (в 6–10 раз по сравнению с обычной);
- возможность поддерживать дугу на малых токах (0,2–50 А) в режимах микроплазменной сварки;
- минимальный нагрев ранее нанесенных слоев при формировании изделий, проникновение в основной металл преимущественно менее 5 %;
- отсутствие разбрызгивания и чрезвычайно низкое перемешивание металла при наращивании слоев;
- возможность регулирования в широких пределах высоты (от 0,5 до 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 и сплавов, композиционные материалы, сплошные и порошковые проволоки и др.);
- возможность изменения состава металла в процессе формирования изделий, получение изделий из материалов с градиентной структурой.

6. Обсуждение результатов исследования современного состояния аддитивных сварочных технологий изготовления объемных изделий

Как показал проведенный анализ, применение сварочных дуговых технологий в современной промышленности является перспективным для изготовления крупногабаритных трехмерных деталей из низкоуглеродистых, высокопрочных, легированных сталей, никелевых, алюминидных, титановых и других сплавов. Перспективным также является получение облегченных пустотелых и биметаллических объемных изделий, а также длинномерных строительных конструкций.

Применение аддитивных сварочных дуговых технологий позволяет достигать существенной экономии дорогостоящих сплавов при изготовлении трехмерных конструкций. Например, соотношение веса израсходованного материала к весу готовой детали сложной формы с ребрами жесткости из титанового сплава Ti-6Al-4V для технологии Wire-Arc Additive Manufacturing составляет 1,1. Для традиционного производства (резка листовых заготовок, сварка, механическая обработка) этот показатель составляет 4,9. По механическим свойствам получаемые напечатанные изделия близки, а по некоторым показателям превосходят, данный сплав в литом

состоянии после термомеханической обработки (горячее изостатическое прессование, ковка).

К основным недостаткам электродуговых сварочных процессов для 3D-печати металлических изделий относятся:

- значительный размер зоны термического влияния (ЗТВ);
- достаточно большие размеры наращиваемого слоя;
- повышенные остаточные напряжения;
- ограничения по составу и типам присадочных материалов.

Для снижения негативного влияния (либо устранения) указанных недостатков целесообразно использовать плазменно-дуговые технологии. Перспективность такого подхода связана с:

- более высокой температуры в факеле плазменной дуги;
- ее меньшими размерами и давлением дуги на расплавленный металл;
- минимизацией нагрева ранее нанесенных слоев и меньшим проникновением наплавляемого металла в основной;
- возможностью регулирования в широких пределах толщины (от 0,5 до 5,0 мм) и ширины (1,5...50,0 мм) наносимого слоя металла;
- возможностью использования более широкой номенклатуры расходных материалов (порошков металлов, сплавов, композиционных материалов, порошковых смесей, сплошных и порошковых проволок);
- возможностью формирования изделий с градиентной структурой.

Аддитивные плазменно-дуговые технологии 3D-печати объемных металлических изделий по сравнению с широко применяемым процессом избирательного лазерного плавления (SLM) отличаются следующим:

- более высокой производительностью по наращиваемому металлу (на 1–2 порядка) при более низкой удельной стоимости оборудования (в 3–10 раз);
- отсутствием ограничений по максимальному размеру вырабатываемых деталей при достижении показателей механической прочности изделий 90...95 % от прочности литого металла.

Для решения проблемы более низких (по сравнению с SLM-технологией) показателей точности геометрических размеров и шероховатости поверхности объемных изделий, получаемых при помощи сварочных технологий, целесообразно объединить эти технологии с ЧПУ-фрезерованием (CNC-Milling).

7. Выводы

1. Анализ современного состояния 3D-технологий изготовления объемных металлических изделий показал следующее. Для изготовления точных деталей малых размеров целесообразно применение лазерных технологий (например, SLM). Для изготовления крупногабаритных деталей целесообразно применение сварочных технологий (например, WAAM, PTA). Среди аддитивных сварочных технологий наиболее перспективными являются плазменно-дуговые. В таких технологиях высокая (5...50 кг/ч и более) производительность сочетается с возможностью получения достаточно тонких (1,5...5,0 мм) стенок при сравнительно небольшом перегреве. Приме-

нение аддитивной плазменно-дуговой печати позволяет повышать точность изготовления и качество поверхности объемных металлических изделий по сравнению с прочими электродуговыми сварочными способами.

2. К основным преимуществам аддитивных сварочных технологий получения трехмерных металлических конструкций сложной формы по сравнению с SLM-технологиями относятся:

- повышение производительности процесса на 1–2 порядка при той же потребляемой мощности; снижение стоимости оборудования в 3–10 раз;

- возможность увеличения в 10–100 и более раз габаритных размеров создаваемых деталей;

- расширение номенклатуры применяемых расходных материалов (порошки, проволоки, композиционные материалы);

- повышение коэффициента использования расходного материала на 20–50 %;

- снижение примерно в 20 раз стоимости оборудования.

К основным недостаткам аддитивных сварочных технологий получения трехмерных металлических конструкций относятся достаточно большие размеры зоны термического влияния и наращиваемого слоя. Это приводит к возникновению нежелательных температурных градиентов, накоплению остаточных напряжений и, как результат – снижению эксплуатационных характеристик. Одним из методов устранения указанных недостатков является повышение термической локальности источника энергии. Например, использование дуговой плазмы косвенного действия.

3. Аддитивные сварочные технологии позволяют достичь примерно 5-кратной экономии материалов в сочетании с повышением качества (например, прочности и плотности) получаемых металлических деталей, по

сравнению с традиционными способами механического изготовления.

4. На сегодняшний день при изготовлении промышленного оборудования для 3D-печати металлических изделий применяют два основных подхода: без сопутствующей механической обработки и с таковой. В первом случае для реализации сварочных технологий широко используются антропоморфные роботы. В случае применения плазменно-дуговых сварочных технологий целесообразным является применение 3D-позиционеров портального типа, дающих возможность использования сопутствующей механической обработки.

5. В Украине изготовлен образец промышленного 3D-принтера PLAZER 3D PW. Он предназначен для изготовления объемных металлических изделий размером до 900×900×900 мм. В основе его функционирования заложены аддитивные технологии порошковой микроплазменной (сварочный ток до 50 А) и плазменной (сварочный ток до 120 А) наплавки. Проведенные при помощи данного образца эксперименты подтвердили перспективность применения аддитивных плазменно-дуговых технологий. В частности, было установлено повышение коэффициента использования расходного материала на 25–40 % по сравнению с электродуговой наплавкой проволокой.

Благодарности

Настоящая работа выполнена при поддержке проекта: «Исследование и разработка технологии и оборудования для высокоэффективной микроплазменной 3D печати» научно-технологической программы города Гуанчжоу (КНР) в 2016 году (№ проекта: 2016201604030062).

Литература

1. Kruth, J.-P. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping [Text] / J.-P. Kruth, M. C. Leu, T. Nakagawa // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1998. – Vol. 47, Issue 2. – P. 525–540. doi: 10.1016/s0007-8506(07)63240-5
2. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок [Текст]: монография / под ред. В. Я. Панченко // Лазерные технологии быстрого прототипирования и прямой фабрикации трехмерных объектов. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.
3. Слюсар, В. И. Фаббер-технологии. Новое средство трехмерного моделирования [Текст] / В. И. Слюсар // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2003. – № 5. – С. 54–60.
4. Bruce, M. R. Measurement and Simulation of Titanium Alloy Deposit Temperature in Electron Beam Additive Manufacturing [Text] / M. R. Bruce, S. F. Riley, M. J. Cola, V. R. Dave, J. E. Talkington // Trends in Welding Research 2012: Proceedings of the 9th International Conference. – Chicago, Illinois, USA, 2012. – P. 963–969.
5. Kruth, J. P. Selective laser melting of iron-based powder [Text] / J. P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, B. Lauwers // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 149, Issue 1-3. – P. 616–622. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051
6. Killander, L. A. Future Direct Manufacturing of Metal Parts with Free-Form Fabrication* [Text] / L. A. Killander, G. Sohlenius // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1995. – Vol. 44, Issue 1. – P. 451–454. doi: 10.1016/s0007-8506(07)62361-0
7. Karunakaran, K. P. Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing [Text] / K. P. Karunakaran, S. Suryakumar, V. Pushpa, S. Akula // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2010. – Vol. 26, Issue 5. – P. 490–499. doi: 10.1016/j.rcim.2010.03.008
8. Pat. No. EP0340939 A1. Cooling workpieces being manufactured by shape melting. B23K9/04, B23K37/003, B23K37/00F [Text] / Doyle T. E., Ryan P. M.; The Babcock & Wilcox Company. – No. EP19890303852; declared: 19.04.1989; published: 08.11.1989, Bul. No. 89/45. – 35 p.
9. Martina, F. Investigation of methods to manipulate geometry, microstructure and mechanical properties in titanium large scale Wire+Arc Additive Manufacturing [Text] / F. Martina. – School of Aerospace, Transport and Manufacturing, Cranfield University, UK, 2014. – 178 p.
10. Kovacevic, R. Development of MultiFab Machine For Rapid Manufacturing/Repair [Text] / R. Kovacevic // The 2003 CTMA Symposium. – Salt Lake City, USA, 2003. – Available at: <http://www.smu.edu/>

11. Alhuzaim, A. F. Investigation in the use of plasma arc welding and alternative feedstock delivery method in additive manufacture [Text] / A. F. Alhuzaim. – Montana Tech of the University of Motana, 2014. – 246 p.
12. Baufeld, B. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties [Text] / B. Baufeld, O. V. der Biest, R. Gault // *Materials & Design*. – 2010. – Vol. 31. – P. S106–S111. doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.032
13. Clark, D. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications [Text] / D. Clark, M. R. Bache, M. T. Whittaker // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol. 203, Issue 1-3. – P. 439–448. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.051
14. Искусство Григория Дочкина [Электронный ресурс]. – CWELD – оборудование и материалы для сварки и резки. – 2015. – Режим доступа: <http://adiosgroup.ru/?p=242>
15. Williams, S. W. Wire + Arc Additive Manufacturing [Text] / S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove // *Materials Science and Technology*. – 2016. – Vol. 32, Issue 7. – P. 641–647. doi: 10.1179/1743284715y.00000000073
16. Colegrove, P. High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology [Text] / P. Colegrove, S. Williams. – Cranfield University, 2013. – 42 p. – Available at: <https://www.xyzist.com/wp-content/uploads/2013/12/Paul-Colegrove-Cranfield-Additive-manufacturing.pdf>
17. Wang, F. Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V [Text] / F. Wang, S. Williams, P. Colegrove, A. A. Antonysamy // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2012. – Vol. 44, Issue 2. – P. 968–977. doi: 10.1007/s11661-012-1444-6
18. Gu, J. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy [Text] / J. Gu, J. Ding, S. W. Williams, H. Gu, J. Bai, Y. Zhai, P. Ma // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 651. – P. 18–26. doi: 10.1016/j.msea.2015.10.101
19. Ding, J. Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture [Text] / J. Ding, P. Colegrove, F. Martina, S. Williams, R. Wiktorowicz, M. R. Palt // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2015. – Vol. 226. – P. 99–105. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.07.005
20. Donoghue, J. The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V [Text] / J. Donoghue, A. A. Antonysamy, F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, P. B. Prangnell // *Materials Characterization*. – 2016. – Vol. 114. – P. 103–114. doi: 10.1016/j.matchar.2016.02.001
21. Zhang, J. Crack path selection at the interface of wrought and wire+arc additive manufactured Ti-6Al-4V [Text] / J. Zhang, X. Zhang, X. Wang, J. Ding, Y. Traore, S. Paddea, S. Williams // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 104. – P. 365–375. doi: 10.1016/j.matdes.2016.05.027
22. Martina, F. Microstructure of Interpass Rolled Wire + Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components [Text] / F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, J. Meyer // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2015. – Vol. 46, Issue 12. – P. 6103–6118. doi: 10.1007/s11661-015-3172-1
23. Colegrove, P. A. High Pressure Interpass Rolling of Wire + Arc Additively Manufactured Titanium Components [Text] / P. A. Colegrove, F. Martina, M. J. Roy, B. A. Szost, S. Terzi, S. W. Williams et. al. // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 996. – P. 694–700. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.996.694
24. Новый металлический 3D-принтер с функцией дуговой сварки от Mutoh Industries Ltd [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.n3d.biz/3d-printery/novuy-metallicheskiy-3d-printer-s-funkciej-dugovoj-svarki-ot-mutoh-industries-ltd.html>
25. 3D-сварка от MX3D распечатает мост над водой [Электронный ресурс]. – Мир сварки. – 2015. – Режим доступа: <http://weldworld.ru/news/razrabotki/5583-3d-svarka-ot-mx3d-raspechataet-most-nad-vodoy.html>
26. Патон, Б. Е. Микроплазменная сварка [Текст] / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, Д. А. Дудко и др. – К.: Наукова Думка, 1979. – 262 с.
27. Гладкий, П. В. Плазменная наплавка [Текст] / П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев. – Киев: ЭкоТехнология, 2007. – 292 с.
28. Korzhik, V. N. 3D-printing of metallic volumetric parts of complex shape based on welding plasma-arc technologies (Review) [Text] / V. N. Korzhik, V. Y. Khaskin, A. A. Grinyuk, V. I. Tkachuk et. al. // *The Paton Welding Journal*. – 2016. – Vol. 2016, Issue 6. – P. 117–123. doi: 10.15407/tpwj2016.06.20
29. Гринюк, А. А. Унифицированный плазматрон для сварки сжатой дугой неплавящимся электродом [Текст]: міжнар. конф. / А. А. Гринюк, В. Н. Коржик, А. А. Бабич, В. И. Ткачук, С. И. Пелешенко // *Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні – PoliWeld-2016*. – 2016. – С. 43–49.
30. Korzhyk, V. Features of joint formation in hybrid plasma-arc welding of aluminum alloys [Text] / V. Korzhyk, V. Khaskin, A. Grinyuk, O. Babych // *American Scientific Journal*. – 2016. – Issue 6. – P. 36–43.
31. Коржик, В. М. Исследование технологических особенностей гибридной плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов [Текст] / В. М. Коржик, В. Ю. Хаскин, А. А. Гринюк, А. А. Бабич, А. Д. Сутковой, Т. В. Олейниченко // *Sciences of Europe*. – 2016. – Issue 6 (6). – P. 45–51.
32. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением [Текст] / под ред. Б. Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
33. Рябцев, И. А. Механизированная электродуговая наплавка деталей металлургического оборудования [Текст] / И. А. Рябцев, И. А. Кондратьев. – Киев: ЭкоТехнология, 1999. – 62 с.
34. Рябцев, И. А. Наплавка деталей машин и механизмов [Текст] / И. А. Рябцев. – Киев: ЭкоТехнология, 2004. – 160 с.