

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. Н. КОРЖИК¹, А. Н. ВОЙТЕНКО^{1,2}, С. И. ПЕЛЕШЕНКО^{3,4}, В. И. ТКАЧУК^{1,2},
В. Ю. ХАСКИН¹, А. А. ГРИНЮК^{1,5}

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

²НПЦ «ПЛАЗЕР», г. Киев, ул. Генерала Наумова, 17А, корп. 1

³Институт машиностроения и автомобилестроения Южно-Китайского технологического университета.

510641, Китай, Гуанчжоу, Гуандонг, ул. Вушан 381, строение 381

⁴Компания «Вэйхань наука и технология». 518071, Китай, Гуанчжоу, Шеньжен, авеню Хуан 1001, строение А4

⁵НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». г. Киев, просп. Победы, 37

Аддитивные технологии имеют огромный потенциал в направлении снижения энергетических и материальных затрат на создание самых разнообразных видов продукции. На сегодня наблюдается повышение доли сварочных технологий в аддитивном производстве металлических объемных изделий. Это связано как с высокой производительностью дуговой сварки (наплавки), так и с ее невысокой стоимостью. В работе описан автоматизированный комплекс для трехмерной печати металлических изделий. Показано, что созданный автоматизированный комплекс позволяет изготавливать объемные металлические изделия методами аддитивной дуговой наплавки плавящимся электродом (на токах до 80 А), плазменной наплавки проволоками (на токах до 120 А) и микроплазменной наплавки порошковыми материалами (на токах до 50 А). Библиогр. 10, рис. 7.

Ключевые слова: аддитивное наращивание, микроплазменная наплавка, проволоки, порошки, комплекс оборудования, технологические исследования, металлография

В современном мире наблюдается стойкий рост интереса к процессам аддитивного производства (технологиям 3D печати). Ожидается, что применение этих процессов принципиально изменит промышленное производство. Это связано с такими возможностями технологий аддитивного производства, как реализация автоматического проектирования деталей, гибкость и быстрота их 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. Аддитивные технологии имеют огромный потенциал в деле снижения энергетических и материальных затрат на создание самых разнообразных видов продукции.

Для наиболее полного использования возможностей трехмерной печати требуется наличие технологий получения высокопрочных объемных изделий из металлов, сплавов, в том числе с высокой твердостью [2]. Использование металлических материалов даст возможность непосредственного получения готовой продукции, а не ее прототипа, как это часто происходит до сих пор

[3]. Поэтому актуальным является создание технологий аддитивного производства готовых металлических объемных изделий. К таким технологиям, в первую очередь, относятся сварочные процессы (например, наплавка).

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). Однако процесс EBM из-за сложности, дороговизны и громоздкости используемого оборудования получил довольно ограниченное распространение [4].

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 плотность (до 99 %), а также точность порядка ± 5 мкм. Вместе с тем, при всей его эффективности и гибкости, процесс SLM также имеет ряд ограничений, которые сужают его применение:

– необходимость использования 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 $10 \text{ см}^3/\text{ч}$ 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.

Большой промышленный интерес для изготовления объемных металлических изделий представляет применение дуговых и плазменных сварочных технологий (например, наплавки) из-за их технической и экономической доступности. На сегодня научно-исследовательская работа по трехмерной дуговой сварке ведется в University of Nottingham (Великобритания), Университете Wollongong (Австралия) и Southern Methodist University (США) [6]. 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 [7]. Была показана необходимость контроля температуры наращиваемых слоев. Особое внимание обращалось на создание изделий из титановых [7] и никелевых [8] сплавов для задач аэрокосмической отрасли.

Таким образом, на сегодня наблюдается повышение доли сварочных технологий в аддитивном производстве металлических объемных изделий. Это связано как с высокой производительностью дуговой сварки (наплавки), так и с ее невысокой стоимостью. Поэтому интерес представляет разработка автоматизированного комплекса для трехмерной печати металлических изделий при помощи таких технологий, а также детальное изучение их особенностей и перспектив дальнейшего промышленного применения.

Целью работы является создание автоматизированного комплекса для изготовления объемных металлических изделий методами аддитивных технологий дуговой и плазменной наплавки и исследование особенностей процессов изготовления металлических пространственных изделий (примитивов).

Для достижения поставленной цели было принято решение использовать блочно-модульную ар-

хитектуру проектируемого комплекса. Такая архитектура позволяет легко изымать существующие и интегрировать новые необходимые составляющие в единую систему, совмещать доступность и простоту составляющих комплекса с необходимой технологической гибкостью и возможностью адаптации оборудования под различные задачи, возникающие при его промышленной эксплуатации. Использование данного типа архитектуры комплекса позволило использовать три сменные наплавочные головки: дуговую с плавящимся электродом (МИГ/МАГ), плазменную и микроплазменную. Это позволяет легко переходить от одного процесса наплавки к другому, используя их преимущества. Так, при необходимости наращивания больших объемов металла целесообразно использовать наплавку МИГ/МАГ, а при необходимости повышения точности, уменьшения толщины наплавляемой стенки и снижения шероховатости — микроплазменную наплавку. Кроме того, для повышения конкурентоспособности и снижения стоимости проектируемого комплекса вместо дорогостоящего антропоморфного робота использовали трехкоординатный позиционер портального типа. Техническими преимуществами такого оборудования являются простота изготовления изделий больших размеров, а также повышенная точность перемещения наплавочного инструмента.

В результате для создания автоматизированного комплекса была выбрана схема, приведенная на рис. 1, согласно которой управление перемещением сменных наплавочных головок *б*, крепящихся на каретке позиционера *1*, осуществляется со стойки системы управления *2* в ручном или автоматическом режиме по ранее заданной программе. Данный узел также управляет сигналом *старт/стоп* для модуля источника питания *4*. В свою очередь модуль *4* управляет сигналом *старт/стоп* для механизма подачи проволоки или порошкового питателя *3* и контролирует наличие протока воды, подаваемой БАО *5*. В процессе работы предлагаемого комплекса площадка, на которой создается объемное металлическое изделие, располагается в трехкоординатном позиционере *1*, который производит аддитивную наплавку путем пространственных перемещений головки *б* по программе, введенной в систему управления *2*.

Принятая блочно-модульная архитектура автоматизированного комплекса позволила изготовить его отдельные блоки независимо друг от друга, что ускорило и упростило этот процесс. Так, был разработан оригинальный недорогой и технологичный трехкоординатный позиционер сменных наплавочных головок (рис. 2, *а, б*). В рабочей зоне позиционера размещается технологическая

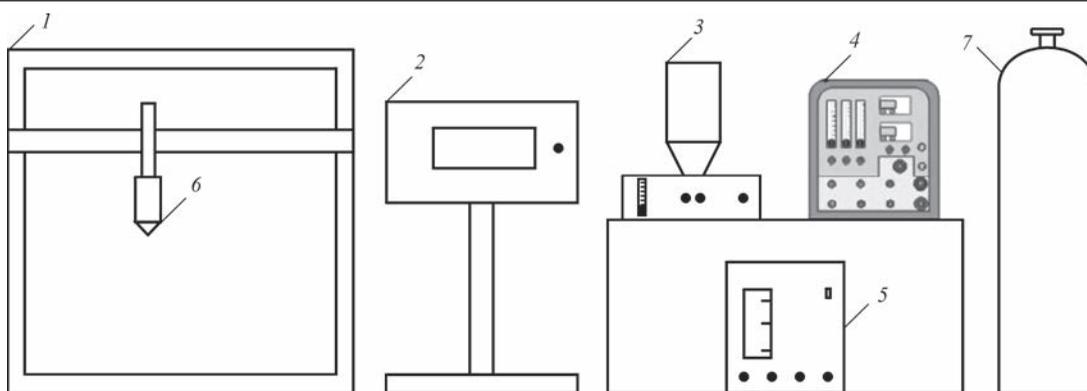


Рис. 1. Функциональная схема комплекса оборудования для изготовления объемных металлических изделий на основе плазменных и дуговых наплавочных технологий: 1 — трехкоординатный позиционер; 2 — система управления; 3 — порошковый питатель (механизм подачи проволоки); 4 — модуль источника питания; 5 — блок автономного охлаждения (БАО) наплавочной головки (плазмотрона); 6 — сменная наплавочная головка; 7 — защитный газ (аргон)

площадка для изготовления объемной металлической детали. Поскольку в качестве расходных присадочных материалов в таких головках используются как порошки, так и проволоки, создаваемый комплекс был укомплектован механизмом подачи проволоки (рис. 2, в) и дозатором порошков (рис. 2, з, д).

Созданный автоматизированный комплекс аддитивной микроплазменной наплавки объемных металлических изделий имеет два источника питания, представляющих собой преобразователи инверторного типа. Один из них рассчитан на реализацию аддитивных технологий плазменной наплавки проволокой (диаметром 0,8/1,2 мм) на сварочных токах до 120 А и порошковой микро-

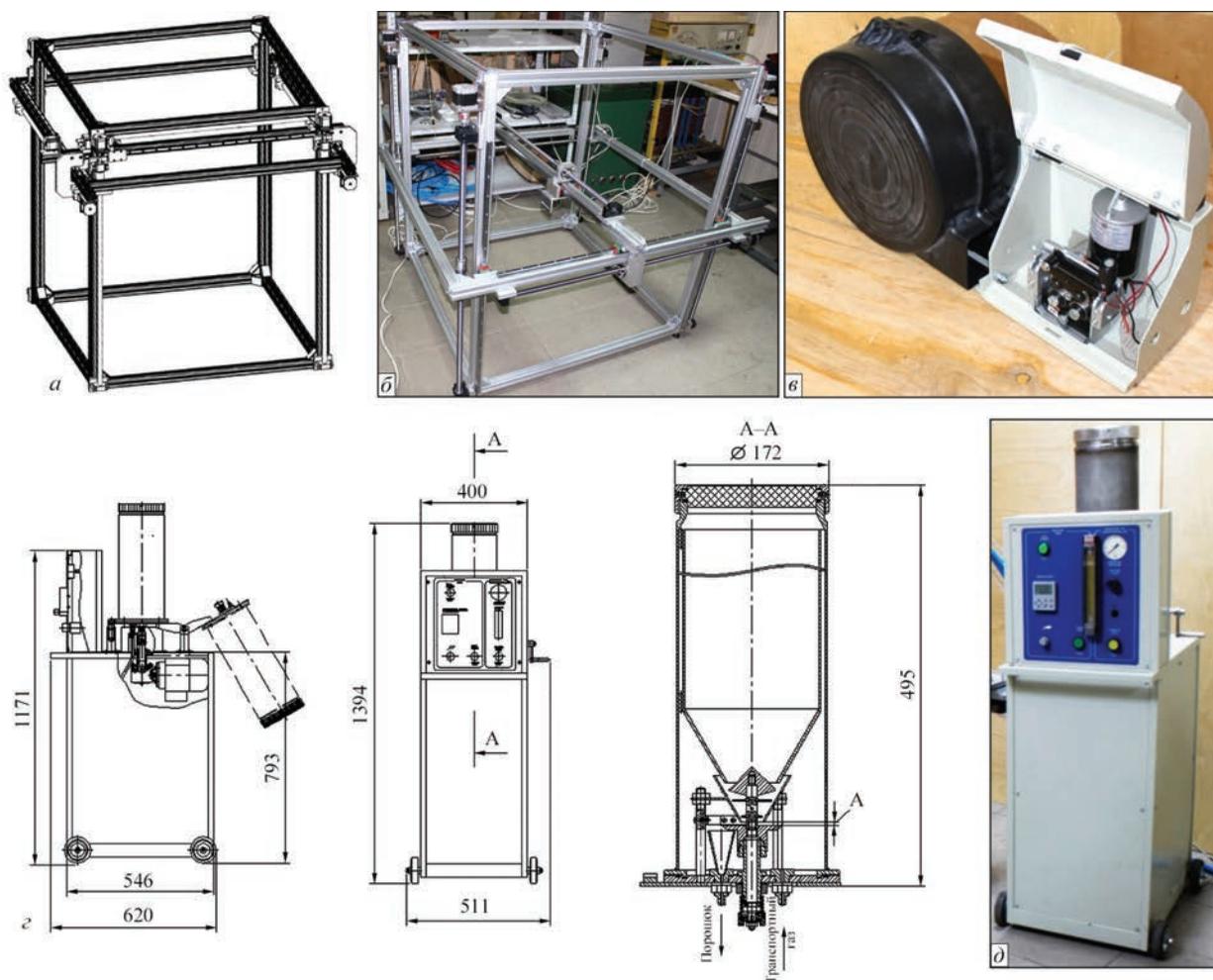


Рис. 2. Блоки автоматизированного комплекса аддитивной наплавки объемных металлических изделий: компьютерная 3D модель (а) и внешний вид (б) трехкоординатного позиционера, механизм подачи проволоки (в), чертеж (г) и внешний вид (д) дозатора наплавочных порошков

плазменной наплавки на сварочных токах до 50 А, а другой — на технологию дуговой наплавки МИГ/МАГ проволокой (диаметром 0,8/1,2 мм) на сварочных токах до 100 А. Соответственно, комплекс снабжен тремя сменными наплавочными головками — дуговой и плазменной для наплавки проволоками и микроплазменной для наплавки порошками. Конструирование таких головок выполнялось при помощи расчетного пакета программ Solidworks Flow Simulation [9]. Этот пакет использует для моделирования один из подразделов вычислительной гидродинамики — механику сплошных сред, включающий совокупность физических и математических исчисленных методов, предназначенных для вычисления характеристик

поточковых процессов. Благодаря данному пакету программ были спроектированы различные модели наплавочных головок. Примером может служить моделирование головок микроплазменной порошковой наплавки и виртуальная проверка их работоспособности (рис. 3). Было установлено, что вариант модели микроплазменной наплавочной головки с внутренней подачей порошка является самым удачным (рис. 3, ж, з, и). В результате были выбраны конструкции и изготовлены головки для трех процессов наплавки: МИГ/МАГ, плазменной и микроплазменной (рис. 4).

Конструкция комплекса включает трехкоординатный позиционер оригинальной разработки с рабочей зоной перемещения наплавочной го-

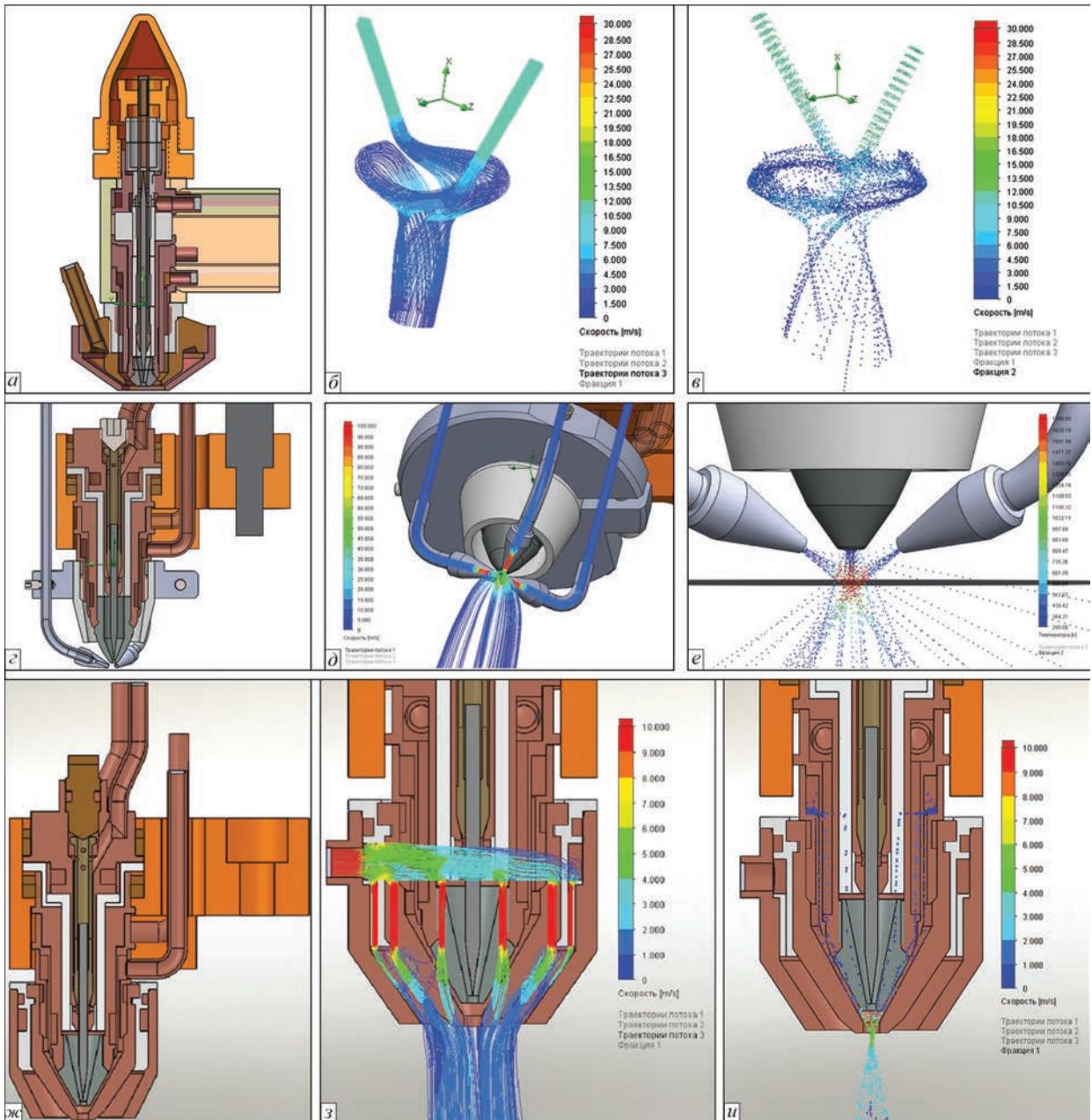


Рис. 3. Конструкция (а, г, ж), скорость и направление потоков транспортирующего газа (б, д, з) и частиц наплавочного порошка (в, е, и) различных моделей микроплазменных головок: а–в — модернизированный плазматрон МПУ-4; г–е — головка с подачей порошка тремя внешними трубками; ж–и — головка с внутренней подачей порошка

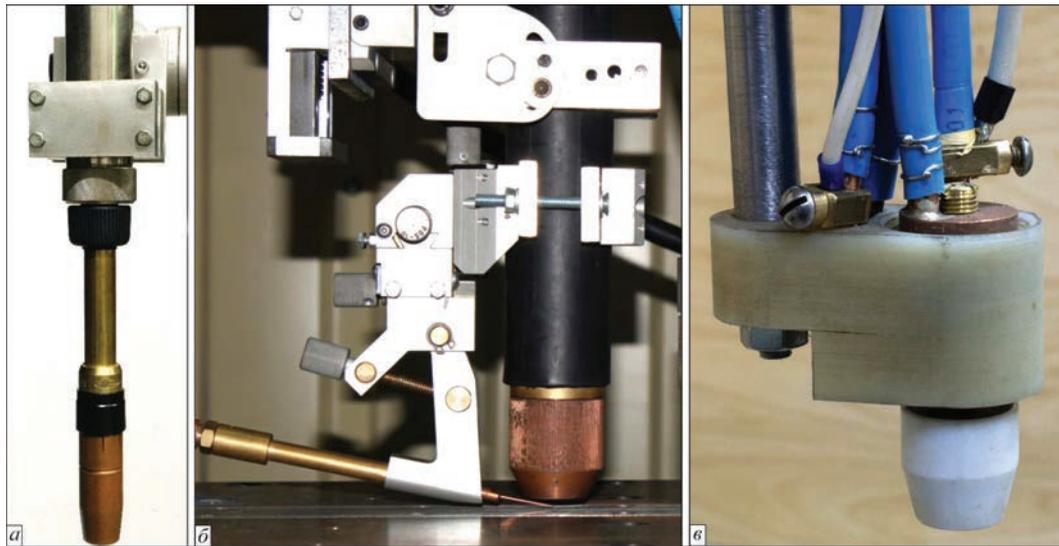


Рис. 4. Внешний вид наплавочных головок: *а* — для наплавки дугой с плавящимся электродом (МИГ/МАГ); *б* — для плазменной наплавки проволоками; *в* — для микроплазменной порошковой наплавки

ловки 900×900×900 мм (рис. 5, *а*). Головка МИГ/МАГ работает на постоянном токе. Плазматроны способны работать в режимах постоянного и импульсного тока прямой полярности, режиме разнополярных импульсов и др. [10]. Управление позиционированием наплавочной головки и подачи проволоки или расходного порошка происходит при помощи системы ЧПУ, которая объединена с источником питания и пультами управления механизма подачи проволоки и порошкового питателя (рис. 5, *б*). Управление автоматизированным комплексом аддитивной наплавки осуществляется при помощи общего PLC-контроллера с возможностью обмена данными по режимам трехмерной печати и управляющими командами с компьютером.

С применением созданного комплекса аддитивной наплавки объемных металлических изделий был проведен ряд экспериментов по изготовле-

нию металлических пространственных примитивов. Для этого использовали сварочную проволоку Св-08Г2С ГОСТ 2246–70 (диаметром 1,0 и 1,2 мм) и наплавочный порошок ПГ-10Н-04 ТУУ 322-19-004-96 (фракция 60...100 мкм). Были получены изделия типа «стенка», «стакан», «конус», «полусфера» (рис. 6). Для определения точности изготовления этих изделий проводилось их измерение с помощью штангенциркуля с ценой деления 0,05 мм. Было установлено, что отклонения полученных аддитивной наплавкой изделий от номинального размера лежат в пределах ±0,5 мм. Помимо определения точности проводили металлографические и механические исследования изготовленных объемных изделий.

Для исследования структурных особенностей металла из наплавленных проволокой Св-08Г2С (диаметром 1,2 мм) образцов типа «стенка» вырезали темплеты, шлифовали и полировали их,



Рис. 5. Автоматизированный комплекс аддитивной наплавки объемных металлических изделий: *а* — манипулятор с плазматроном и порошковым дозатором-питателем; *б* — вид блока питания и управления с открытой лицевой панелью



Рис. 6. Металлические изделия, изготовленные на разработанном комплексе: *а* — стенка 5×70 мм, плазменная наплавка проволокой Св-08Г2С (диаметр 1,2 мм) за 50 проходов; *б* — конус, наплавка проволокой Св-08Г2С (диаметр 1,0 мм); *в* — стакан диаметром 80 мм, наплавка МИГ/МАГ проволокой Св-08Г2С (диаметр 1,2 мм); *з* — стакан диаметром 40 мм, микроплазменная наплавка порошком ПГ-10Н-04

а затем подвергали травлению в 4%-ом растворе азотной кислоты. Выявленные структуры изучали при помощи микроскопа «Neophot-31». На отполированных непотравленных образцах изучали наличие пористости и неметаллических включений. Эти исследования показали, что пористость наплавленных стенок не превышает 1...2 % (рис. 7, *а*). Изучение структуры образцов показало укрупнение дендритных зерен в верхней части и наличие более мелких равноосных зерен в средней и нижней части (рис. 7, *б*). Это объясняется перекристаллизацией предыдущих наплавленных слоев при нанесении последующих. Щелей между соприкасающимися слоями и по линии сплавления нет (рис. 7, *в*). Размер зоны термического влияния от наращиваемого слоя составляет 2 мм. Структура как зоны сплавления (рис. 7, *з*), так и наплавленного материала равноосная, перемешивание слоев чрезвычайно низкое.

Прочность наплавленного металла оценивали путем усреднения результатов испытаний в условиях одноосного статического растяжения трех образцов. Испытания вырезанных из наплавленных стенок образцов типа XIII ГОСТ 6996–66 проводились с помощью универсальной сервоги-

дравлической разрывной машины MTS 810. Их результаты показали, что механическая прочность полученных аддитивной плазменной наплавкой проволокой Св-08Г2С изделий составляет порядка 90...95 % прочности литого металла.

Основными недостатками разрабатываемых технологичных процессов можно считать:

- значительные неровности и шероховатости стенок, формируемых аддитивной дуговой и плазменной наплавкой изделий;

- перегрев стенок изделий в процессе наплавки, приводящий к их термической деформации.

Для устранения первого из данных недостатков целесообразно использовать традиционную механическую обработку, например, токарную (рис. 6, *в*). Для устранения второго недостатка возможно применение лазерного пирометра, постоянно контролирующего температуру наплавливаемых стенок и передающего информацию системе управления. Последняя может корректировать режим наплавки соответственно уровню нагрева изделия. Еще одним вариантом устранения этого недостатка может быть принудительное охлаждение наплавливаемых стенок изделия.

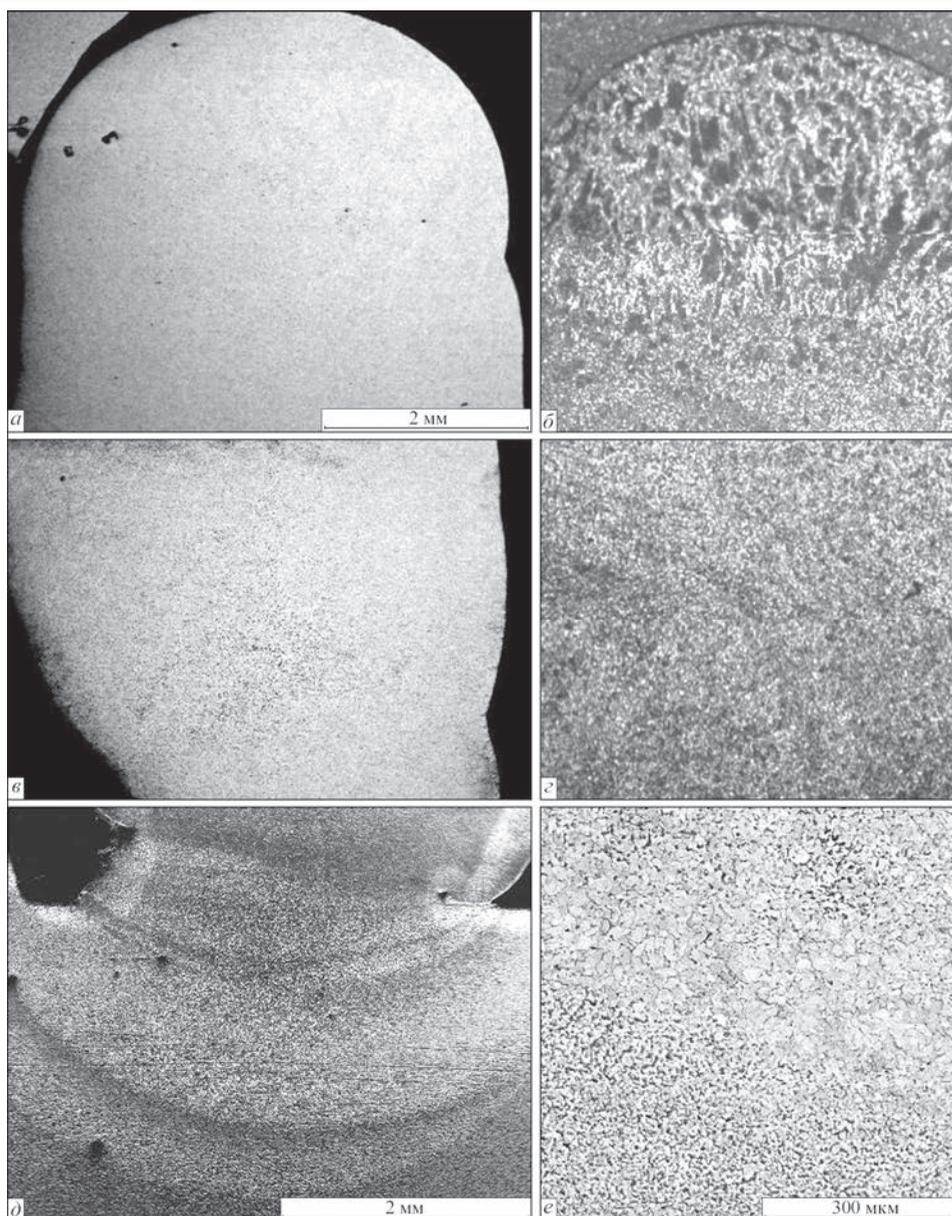


Рис. 7. Структуры аддитивной плазменной наплавки примитива типа «стенка» с использованием проволоки Св-08Г2С: а — нетравленный шлиф верхней части; б — структура верхней части после травления, $\times 63$; в — нетравленный шлиф средней части; г — структура средней части после травления, $\times 63$; д — линия сплавления и зона термического влияния, $\times 35$; е — зона сплавления, $\times 200$

Таким образом, созданный автоматизированный комплекс позволяет изготавливать объемные металлические изделия методами аддитивной дуговой наплавки плавящимся электродом (на токах до 80 А), плазменной наплавки проволоками (на токах до 120 А) и микроплазменной наплавки порошковыми материалами (на токах до 50 А).

Исследование особенностей процессов изготовления металлических пространственных примитивов типа «стенка», «стакан», «конус» и «полусфера» показали, что отклонения от номинального размера при их изготовлении не превышают $\pm 0,5$ мм, пористость лежит в пределах 1...2 %, а механическая прочность составляет порядка 90...95 % прочности литого металла. Структура наплавленного материала мелкозер-

нистая, равноосная, перемешивание слоев чрезвычайно низкое.

Список литературы

1. Kruth J. P., Leu M. C., Nakagawa T. (1998) Progress In Additive Manufacturing And Rapid Prototyping. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 47(2), 525–540.
2. Слюсар В. И. (2003) Фаббер-технологии. Новое средство трехмерного моделирования. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 5, 54–60.
3. Korzhyk V. N., Khaskin V. Yu., Grinyuk A. A. et al. (2016) 3D-printing of metallic volumetric parts of complex shape based on welding plasma-arc technologies (Review). *The Paton Welding Journal*, 5-6, 117–123.
4. Bruce M. R., Riley S. F., Cola M. J. et al. (2012) Measurement And Simulation Of Titanium Alloy Deposit Temperature In Electron Beam Additive Manufacturing. *Trends In Welding Research 2012: Proceedings of the 9th International Conference, Chicago, Illinois, USA, June 4–8*, pp. 963–969.

5. Kruth J. P. (2004) Selective laser melting of iron-based powder. *J. Mater. Process. Technol.*, **149**, 616–622.
6. Alhuzaim A. F. (2014) Investigation in the use of plasma arc welding and alternative feedstock delivery method in additive manufacture. *A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science General Engineering*, Montana Tech of the University of Montana.
7. Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. S. (2010) Additive Manufacturing of Ti–6Al–4V Components by Shaped Metal Deposition: Microstructure and Mechanical Properties. *Materials & Design*, **31**, 106–111.
8. Clark D., Bache M. R., Whittaker M. T. (2008) Shaped Metal Deposition of a Nickel Alloy for Aero Engine. *Journal of Materials Processing Technology*, **203**, 439–448.
9. (2009) *Основные элементы SolidWorks (SolidWorks 2010)*. Dassault Systems SolidWorks Corporation.
10. Гринюк А. А., Коржик В. Н., Бабич А. А. и др. (2016) Унифицированный плазмотрон для сварки сжатой дугой неплавящимся электродом *Зб. доповідей Міжнародної конференції «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні – PoliWeld-2016 (26-27 мая 2016)*. Київ, НТУУ «КПІ», сс. 43–49.

В. М. Коржик¹, О. М. Войтенко^{1,2}, С. І. Пелешенко^{3,4},
В. І. Ткачук^{1,2}, В. Ю. Хаскін¹, А. А. Гринюк^{1,5}

¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua
²НПЦ «ПЛАЗЕР»,
м. Київ, вул. Генерала Наумова, 17А, корп. 1

³Інститут машинобудування і автомобілебудування
Південно-Китайського технологічного університету,
м. Гуанчжоу, КНР

⁴Компанія «Вейхань наука і технологія», м. Шеньжен, КНР
⁵НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».
м. Київ, просп. Перемоги, 37

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРИВИМІРНИХ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ НА ОСНОВІ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Аддитивні технології мають величезний потенціал у напрямку зниження енергетичних та матеріальних витрат на створення найрізноманітніших видів продукції. На сьогодні спостерігається підвищення частки зварювальних технологій в адитивному виробництві металевих об'ємних виробів. Це пов'язано як з високою продуктивністю дугового зварювання (наплавлення), так і з його невисокою вартістю. У роботі описаний автоматизований комплекс для тривимірного друку металевих виробів. Показано, що створений автоматизований комплекс дозволяє виготовляти об'ємні металеві вироби методами адитивного дугового наплавлення електродом, що плавиться (на токах до 80 А), плазмового наплавлення дротами (на токах до 120 А) і мікроплазмового наплавлення порошковими матеріалами (на токах до 50 А). Бібліогр. 10, рис. 7.

Ключові слова: адитивне нарощування, мікроплазмове наплавлення, дроти, порошки, комплекс обладнання, технологічні дослідження, металографія

Поступила в редакцію 12.05.2017



Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Международная Ассоциация «Сварка»

Восьмая международная конференция ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРКЕ И ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

11 – 15 сентября 2017 г.
Украина, Одесса, отель «Курортный»

Председатели программного комитета
академик И.В. Кривцун
проф. В.С. Коваленко

Тематика конференции

- Лазерная и электронно-лучевая сварка, резка, наплавка, термообработка, нанесение покрытий
- Электронно-лучевая плавка и рафинирование
- Гибридные процессы
- 3D-технологии
- Моделирование лучевых технологий
- Материаловедческие проблемы лазерных и электронно-лучевых технологий

Подача заявок на участие и тезисов докладов до 23.06.2017 г.

ОБОРУДОВАНИЕ ♦ ТЕХНОЛОГИИ ♦ МОДЕЛИРОВАНИЕ



АДРЕС ОРГКОМИТЕТА
Украина, 03680, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11
Институт електросварки ім. Е.О. Патона НАН України
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/rus/twmp2017>

