

## ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ СПОСОБОМ 3D-ПЕЧАТИ

© 2019 г. Д. Н. Борисенко<sup>а,\*</sup>, Е. Б. Борисенко<sup>а</sup>,  
А. А. Жохов<sup>а</sup>, Б. С. Редькин<sup>а</sup>, Н. Н. Колесников<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физики твердого тела РАН  
Россия, 142432, Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипьяна, 2

\*e-mail: bdn@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 17.04.2019 г.

После доработки 17.04.2019 г.

Принята к публикации 22.04.2019 г.

Разработано оригинальное оборудование и показана принципиальная возможность изготовления профилированных изделий из тугоплавких металлов способом 3D-печати с помощью электрической дуги высокого давления в атмосфере защитных газов. Предлагаемый способ реализуется послойным нанесением металла по типу локальной гарнисажной электродуговой плавки. В экспериментах по изготовлению тиглей из молибдена было показано, что скорость печати на 2–3 порядка выше скорости печати селективным лазерным спеканием.

DOI: 10.1134/S0032816219050185

### ВВЕДЕНИЕ

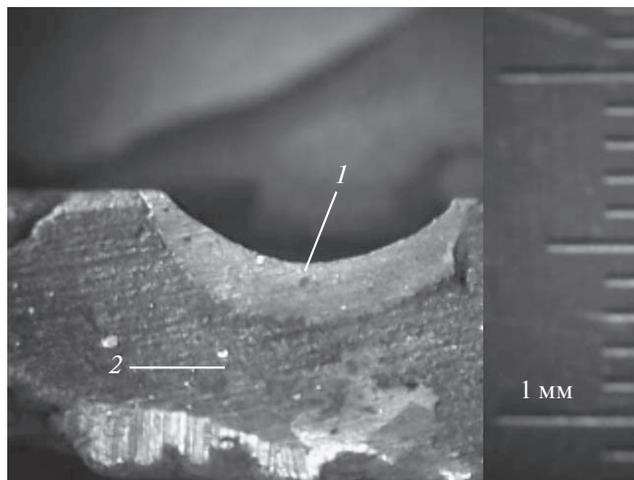
Изготовление фасонных деталей и изделий сложной геометрии из тугоплавких металлов, таких как вольфрам, молибден, ниобий, традиционными технологиями является сложным многостадийным процессом, в производственный цикл которого (с момента получения порошка в качестве исходного сырья) включены следующие этапы: обработка давлением, высокотемпературный отжиг,ковка, сварка, литье, обработка металлов резанием. Большая часть операций проводится при высоких температурах (~1500°C) в среде защитных газов или в восстановительной атмосфере водорода. Энергоемкость только одного этапа производства – спекания компактированного порошка – на 1 кг веса готового изделия превышает 100 кВт·ч, причем полученный таким образом металлокерамический молибден уступает по жаропрочности молибдену, полученному дуговым плавлением. Стоит отметить, что перечисленные тугоплавкие металлы в расплавленном состоянии активно взаимодействуют с печными газами и большинством огнеупорных материалов. Это представляет собой еще одну проблему, которую необходимо учитывать при разработке технологических процессов производственного цикла.

Стоит отметить, что в настоящее время интенсивно совершенствуется и внедряется в производственный цикл машиностроительных предприятий авиационной промышленности разработан-

ная в середине 1980-х годов в США технология селективного лазерного спекания, реализующая генеративный дизайн в материале [1, 2]. Этот метод аддитивного производства, заключающийся в послойном спекании мелкодисперсного порошка (диаметром десятки нанометров) с помощью лазера, имеет ряд существенных недостатков: большая стоимость исходных порошков, обусловленная высокими требованиями к сферичности, гранулометрическому составу, условиям их производства и хранения; высокая пористость получаемого спеченного материала, которая в случае изготовления ответственных деталей, требует дополнительной обработки давлением, что для некоторых металлов и сплавов является неприемлемым; большая продолжительность процесса изготовления деталей, обусловленная микронной толщиной слоя, наносимого за один цикл спекания материала. Поэтому развитие нового способа аддитивного производства, лишенного этих недостатков, является актуальной задачей.

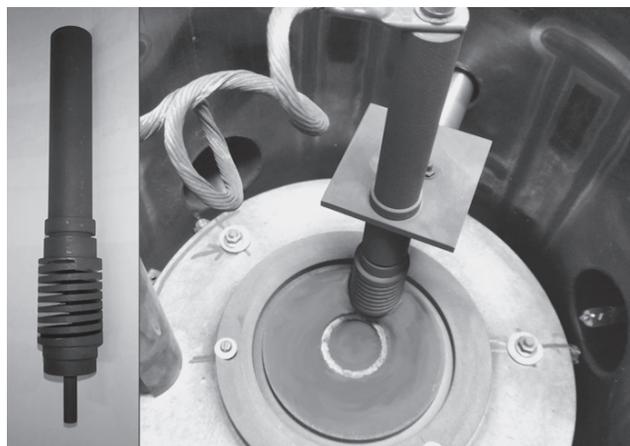
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для разработки методики аддитивного производства профилированных изделий из тугоплавких металлов способом локальной гарнисажной электродуговой плавки порошков спроектирована и изготовлена установка, состоящая из герметичного водоохлаждаемого корпуса, позволяю-



**Рис. 1.** Поперечное сечение гарнисаж-электрода (анода). 1 – зона расплава; 2 – исходный порошок (гарнисаж).

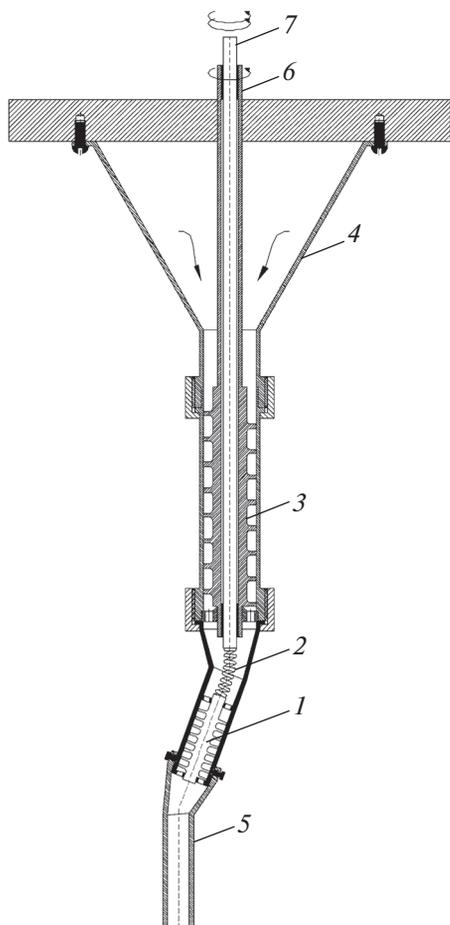
шего проводить процесс в защитной среде инертных газов или водорода при давлениях, не превышающих 0.2 МПа, устройства прецизионной подачи металлического порошка, узлов перемещения рабочего стола и неплавящегося электрода (катода), источников питания электрической дуги. Контролируемыми параметрами процесса являются: линейная скорость перемещения катода над поверхностью гарнисаж-электрода (анода), представляющего собой рабочий стол с загрузкой металлического порошка (вольфрама, молибдена или ниобия), непрерывно поступающего в зону плавления с контролируемой скоростью; рабочий ток электрической дуги прямого действия и величина зазора между катодом и анодом. Послойное наращивание слоев происходит за счет вертикального перемещения рабочего стола в ступенчатом или непрерывном режиме по мере завершения наплавки текущего слоя, поперечное сечение которого показано на рис. 1. Достоинствами локальной гарнисажной электродуговой плавки порошков являются: 1) получение структуры плавленого металла, превосходящей по эксплуатационным характеристикам спеченный компактированный металлический порошок; 2) высокая производительность процесса за счет большей глубины плавления каждого слоя (1–2 мм) по сравнению с микронной толщиной слоя, наращиваемого за один цикл в способе селективного лазерного спекания; 3) возможность реализации рафинирующих переплавов исходного шихтового порошка при многократном проходе каждого слоя; 4) экономия электроэнергии; 5) снижение остаточных термических напряжений в изделии за счет динамического отжига, обусловленного большей тепловой инерционностью процесса дуговой плавки металла в гарнисаж-электроде по



**Рис. 2.** Электрод и кольцевая зона (вид сверху) плавления гарнисаж-электрода.

сравнению с аналогичными условиями, создаваемыми лазерным лучом в зоне спекания металлического порошка; 6) возможность использования порошков тугоплавких металлов, стандартно выпускаемых промышленностью без специальной предварительной подготовки.

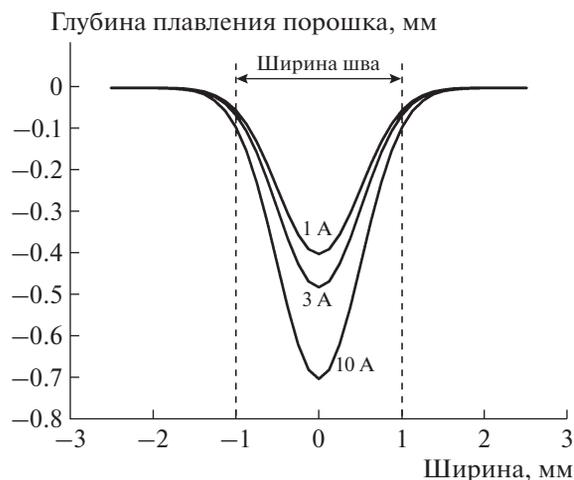
Вольт-амперные характеристики дуги зависят от потенциалов ионизации и теплопроводности газовой атмосферы. Рабочее напряжение дуги примерно равно катодному падению потенциала (при малых дуговых промежутках и атмосферном давлении) и в случае использования аргона составляет около 16 В, гелия – 25 В, водорода – 50 В. Для возбуждения дуги требуются более высокие значения напряжения (напряжение холостого хода). Чем выше напряжение холостого хода, тем легче зажечь сварочную дугу. Эмпирическим путем было установлено, что напряжение холостого хода для аргона составило около 98 В, для гелия – 150 В, для водорода – 310 В, что примерно в 6 раз выше катодного падения потенциала. В соответствии с требованиями ГОСТ Р МЭК 60974-1-2012 номинальное напряжение холостого хода при различных условиях эксплуатации не должно превышать 113–140 В (и до 500 В для специальных процессов, например плазменной резки). Поэтому нами были разработаны и опробованы источники питания электрической дуги в среде различных газов (аргон, гелий, водород) с различными вольт-амперными характеристиками, устройствами обеспечения безопасности, зажигания и стабилизации дуги. С помощью контролируемого пинч-эффекта [3] решена задача генерации и стабилизации плазменного канала дуги высокого давления при произвольном профиле сканирования электрода. Разработана и запатентована конструкция электрода для дуговой плавки металлов в атмосфере аргона [4].



**Рис. 3.** Схема устройства прецизионной подачи порошков в зону плавления. 1 – шнек малого диаметра; 2 – спиральный транспортер-ворошитель; 3 – корпус шнека; 4 – бункер; 5 – патрубок; 6, 7 – приводы.

Особенность конструкции электрода обеспечивает устойчивость плазменного канала дуги за счет того, что сварочный ток, протекающий через соленоид, формирует магнитное поле вокруг дугового канала, которое сжимает плазму в радиальном направлении и стабилизирует ее прямолинейное течение в аксиальном направлении, позволяя вести процесс сварки в контролируемых условиях. На рис. 2 представлены электрод и кольцевая зона плавления гарнисаж-электрода.

Разработано и изготовлено оригинальное устройство прецизионной подачи порошков в зону плавления для непрерывного ведения процесса наплавки материала. На рис. 3 представлена схема устройства. Прецизионная подача порошков в технологическую зону из бункера 4 через патрубок 5 осуществляется через промежуточную камеру-рецивир, расположенную под углом к корпусу шнека 3 и снабженную спиральным транспортером-ворошителем 2, обеспечивающим подготовку порошков и передающим вращение шнеку 1 малого



**Рис. 4.** Ширина и глубина зоны плавления молибденового порошка при различных токах дуги.

диаметра, который выполняет роль дозатора порошков. Для вращения шнеков и спирального транспортера, скорости вращения которых синхронизированы, используются различные приводы (6 и 7). Рабочие поверхности шнекового дозатора выполнены из закаленной конструкционной стали и подвергнуты электрохимической полировке для уменьшения сопротивления движению порошков.

Для экспериментов по отработке методики изготовления профилированных изделий из тугоплавких металлов использовали тигли из молибдена и нагревательные элементы, изготовленные из 5-мкм молибденового порошка ПМ 99.9 ТУ 14-22-160-2002, содержащего не менее 92% основной фракции. Источником питания служил сварочный инвертор Gigant WM MMA-190 с напряжением холостого хода 60 В. Для увеличения напряжения до 100 В, а также для обеспечения безопасности был разработан и изготовлен DC/DC-конвертер на основе бустерной схемы повышения напряжения. Для бесконтактного зажигания дуги использовали осциллятор последовательного включения ОСПЗ-300М-1. Во избежание высоковольтного пробоя и повреждения полупроводниковых силовых элементов инвертора и бустера был разработан и изготовлен двухкаскадный фильтр с применением синфазного и дифференциального дросселей, керамических конденсаторов и газового разрядника. Это позволяло проводить процесс наплавки в непрерывном режиме в течение всего цикла изготовления детали.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При использовании электрода с соленоидом в процессе плавления молибденового порошка при различных токах дуги от 1 до 10 А ширина анодно-

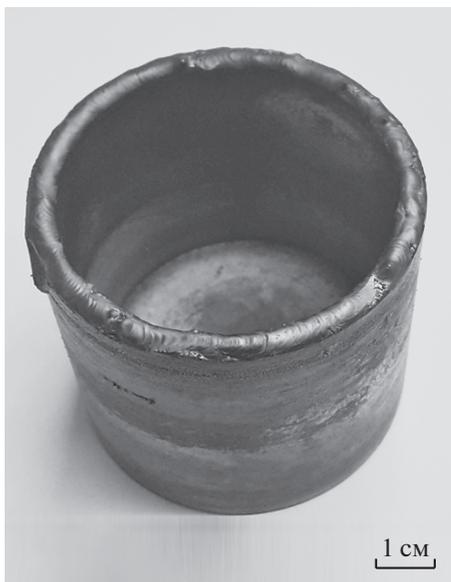


Рис. 5. Тигель из молибдена.

го пятна составляет  $\sim 2$  мм, а глубина зоны плавления варьируется от 0.35 до 0.7 мм (рис. 4). В экспериментах по изготовлению тиглей из молибдена оптимальные параметры режима дугового разряда были таковы: ток дуги 10 А, рабочее напряжение 20 В, зазор между катодом и анодом 2 мм; рабочая атмосфера – аргон под давлением 0.1 МПа. Линейная скорость дуги над поверхностью гарнисаж-электрода при диаметре тигля 50 мм составляла  $\sim 5$  мм/с, что соответствует частоте вращения гарнисаж-электрода 2 об/мин. Расход молибденового порошка составлял 0.4 г/с. При условии двойного переплава каждого слоя глубиной 0.5 мм и толщине стенки тигля 4.5 мм слой наплавляли за 8 оборотов гарнисаж-элек-



Рис. 6. Молибденовый нагревательный элемент для индукционной печи.

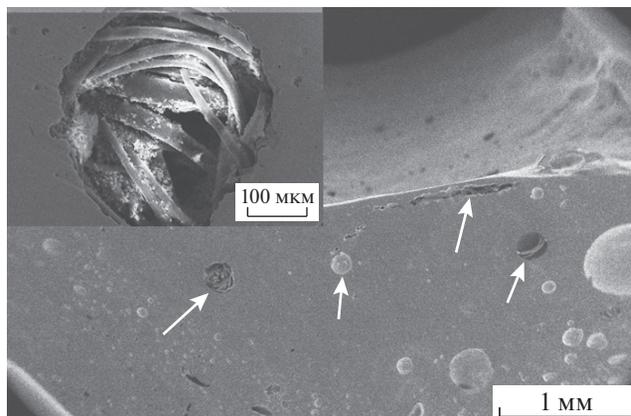
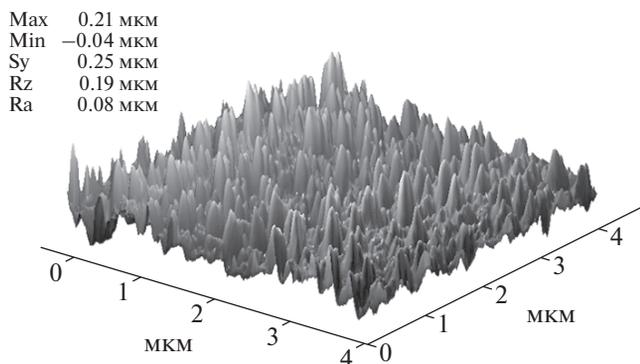


Рис. 7. Микроструктура плавленого молибдена. Стрелками показаны единичные поры.

трода. Изготовление тигля массой 320 г (рис. 5) заняло 8.5 ч и потребовало около 15 кВт · ч электроэнергии, что в пересчете на 1 кг молибдена составило примерно 47 кВт · ч. Из представленных результатов эксперимента следует, что скорость печати по вертикали способом локальной гарнисажной электродуговой плавки составляет 6 см/ч за один оборот гарнисаж-электрода, что в 2.4 раза выше скорости печати методом селективного лазерного спекания, скорость нарастания изделия по вертикали в котором по литературным данным составляет  $\sim 1.5$ – $2.5$  см/ч [5]. С учетом того, что стенка тигля толщиной 4.5 мм в описанном эксперименте формируется за 8 оборотов, разница в скорости печати становится и того меньше. Однако литературные данные не соответствуют заявленным производителями установок селективного лазерного спекания/плавления и явно завышены в 10 раз. Например, 3D-принтер последнего поколения SLM-125 компании SLM Solutions [6] имеет заявленную максимальную производительность 25 см<sup>3</sup>/ч при размерах рабочего пространства 12.5 × 12.5 см. Для этих значений максимальная скорость нарастания слоя по вертикали равна 0.16 см/ч. На указанной площади рабочего пространства может разместиться 4 тигля Ø50 мм. Таким образом, скорость нарастания изделия по вертикали увеличится пропорционально количеству тиглей и составит 0.64 см/ч. По описанной нами методике скорость нарастания стенок тигля по вертикали при двойном проходе каждого слоя составляла 0.75 см/ч. Однако стоит заметить, что в экспериментах по изготовлению тиглей была использована конструкция электрода с узкой зоной плавления металла с целью дальнейшего изучения пористости полученного материала. Уменьшая количество витков соленоида, можно увеличить ширину зоны плавления до  $\sim 5$  мм (рис. 1) и довести скорость нарастания стенок тигля по вертикали до 6 мм/ч за один оборот гарнисаж-электрода,



**Рис. 8.** Изображение рельефа поверхности, полученное с помощью атомно-силового микроскопа Solver P-47, NT-MDT.

что на порядок выше заявленной скорости принтера SLM-125.

По описанной методике также был изготовлен молибденовый нагревательный элемент для индукционной печи, который показан на рис. 6.

При изучении микроструктуры и свойств полученного плавленого молибдена на сканирующем электронном микроскопе VERSA 3D HighVac было обнаружено, что пористость при двукратном проходе ванны расплава каждого слоя практически сводится к нулю, оставшиеся единичные поры содержат виссеры микронного размера (рис. 7).

По данным рентгеноструктурного анализа было обнаружено, что при использовании неплавящегося электрода из графита в экспериментах с использованием дуги обратной полярности на поверхности деталей из молибдена образуется слой карбида молибдена  $\text{Mo}_2\text{C}$  различной шероховатости. Это позволило разработать методику электроэрозионной обработки поверхности для получения функциональных покрытий на деталях из молибдена. Методика реализуется за счет применения высокочастотной высоковольтной электрической дуги (напряжение 2000 В, ток 0.5–1 А) высокого давления 0.1 МПа в атмосфере водорода

с фиксированным зазором между электродами 2 мм и жесткой внешней характеристикой источника тока, причем скважность импульсов варьируется от 1.1 до 10 в зависимости от заданной шероховатости покрытия из  $\text{Mo}_2\text{C}$  в диапазоне  $Ra = 0.08–0.4$  мкм. Изображение рельефа поверхности, который изучали с помощью атомно-силового микроскопа Solver P-47, NT-MDT, показано на рис. 8.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и изготовлена установка для аддитивного производства профилированных изделий из тугоплавких металлов способом локальной гарнисажной электродуговой плавки. Предложена методика изготовления тиглей из молибдена и нагревательных элементов для индукционных печей в атмосфере аргона. Изучена пористость молибдена после двукратного переплава. Предложен способ нанесения функциональных покрытий из  $\text{Mo}_2\text{C}$  на поверхности деталей из молибдена.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания Института физики твердого тела РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров А.П., Окунькова А.А. // Вестник СГТУ. 2012. № 3 (67). С. 76.
2. Головкин О.Л., Хилов С.И. Патент на изобретение № 2569279 РФ // Оpubл. 20.11.2015. Бюл. № 32.
3. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
4. Борисенко Д.Н., Колесников Н.Н. Патент на изобретение № 2682553 РФ // Оpubл. 19.03.2019. Бюл. № 8.
5. Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб.: Питер, 2016.
6. Интернет-ресурс компании по производству оборудования для вакуумного литья и лазерного плавления металлов SLM Solutions: <https://www.slm-solutions.com/products/machines/slmr125/>