

## 3D ПЕЧАТЬ В СУДОСТРОЕНИИ

*Морская индустрия в целом не спешит принимать концепцию 3D печати. Использование непрерывного осаждения жидких металлов при программном управлении компьютера создало возможности для производства изделий сложных форм, таких как, например, поковки и отливки, избегая при этом необходимости в дорогой оснастке и временных задержек на изготовление пресс-форм. Несмотря на медленное начало, работы по разработке 3D технологий в Техническом университете Делфта в 2017 г. привели к производству первого в мире гребного винта путем осаждения металла. Большинство опубликованных материалов по 3D печати были недостаточно подробны, особенно в области медицины. Хотя и они иллюстрируют производство небольших сложных форм как процесс медленный и дорогой. Меньше публикаций, описывающих производство, в которых крупные технические изделия с использованием металлов производятся быстрее и с меньшими затратами, чем при использовании традиционных методов, таких как литье иковка.*

**Концепция 3D печати.** Несколько методов для трехмерной печати с использованием металлов в настоящее время регулярно применяются специализированными организациями. По сути, они включают использование целевого источника тепла для плавления или спекания металлических сплавов при постепенном построении сложной трехмерной формы. Комплектуется компьютерная система с ЧПУ обычно многоосным роботом и направляющим источником тепла. Твердый металл в виде проволоки или порошка подается и плавится от источника тепла.

Один вариант использует лазер или электронный луч в качестве источника тепла в сочетании с металлическим порошком. Спекание происходит с помощью прямого лазера — Direct Metal Laser Sintering (DMLS) или электронного луча — Direct Metal Electron Beam Sintering (DMEBS). Эта порошковая техника наиболее эффективно применяется там, где требуется изготовить небольшие, delicate предметы. Примером является производство имплантатов тела [1–3].

При сварочной версии 3D печати «проволока-дуга» — Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) выполняется укладкой жидких капель из металла (рис. 1). Эта техника больше подходит для производства более крупных и тяжелых инженерных компонентов, о чем свидетельствует производство морских изделий и конструкции планера [4–6].

По сравнению с применением процессов WAAM и DMLS/DMEBS, сварочная версия наиболее подходит для производства более тяжелых и крупных продуктов, в то время как порошковая альтернатива лучше всего применяется там, где необходимо получение более мелких со сложной формой изделий. Другими словами, сварка — это, по сути, метод объемного наращивания, а использование порошка — это точный и строго контролируемый процесс.

**Примеры производства WAAM.** Несколько достижений в области 3D производства были получены и уместно проиллюстрировать их дости-

жения применительно к морской промышленности (рис. 1–4).

**Движущие силы по развитию WAAM.** Основной движущей силой развития является потенциал в части значительной экономии материалов. Одна конкретная область применения — производство планеров. Многие компоненты в настоящее время выполняются путем механической обработки из цельной заготовки послековки, при этом более 50 % исходного материала теряется в виде стружки. Другая рассматриваемая область — производство шасси, где ожидаемая экономия материала составляет 70 % при использовании аддитивного производства.

**Текущая активность.** Аддитивное изготовление изделий определяет несколько преимуществ, таких как значительное сокращение потерь материала, особенно при производстве многих разнородных деталей, и способность быстро создавать большое разнообразие изделий для опытных работ.

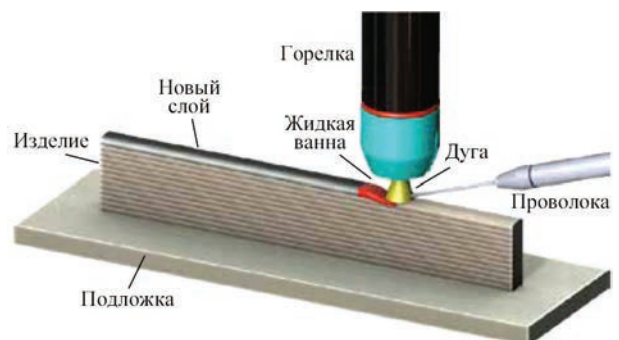


Рис. 1. Иллюстрация процесса WAAM



Рис. 2. Винт 200×240×240 мм (материал: 1.5125 G3Si1)



Рис. 3. Корпус колокола 230×380×380 мм (материал — алюминевый сплав)

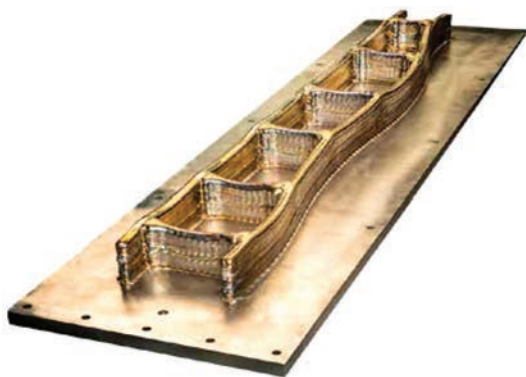


Рис. 4. Основной конструктивный элемент крыла самолета

Существует также ключевое преимущество, заключающееся в том, что процесс позволяет рассматривать возможности получения нетрадиционных конструкций, которые в противном случае невозможно практически изготовить из-за производственных или стоимостных ограничений, например, из-за сложных или необычных геометрий, сопровождающихся необходимостью решения ряда проблем.

Ранняя работа в Rolls-Royce в Университете Крэнфилд была направлена на применение 3D печати в производстве авиационных двигателей. Исследователями был разработан процесс осаждения «проволока + дуга» для изучения возможности использования в качестве конструкционных материалов инконеля, титана, алюминия и различ-

ных никелевых сплавов. С тех пор акцент сместился на изготовление планеров. Хотя «лазер + порошок» полезны для определенных применений, таких как быстрое прототипирование или для получения очень небольших и сложных деталей, эта технология ограничена из-за своей низкой скорости и ограниченных размеров компонентов, которые можно точно изготовить. Напротив, процессы, разрабатываемые в Крэнфилд, рассчитаны на высокие скорости осаждения. Центр Крэнфилда в настоящее время нацелен на уровень осаждения 10 кг/ч, по сравнению с обычными 0,1 кг/ч, используя «лазер + порошок», при котором может потенциально быть риск того, что материал не будет полностью уплотнен, если не произошло спекание между частицами порошка.

Аддитивные дуговые и проволочные системы также позволяют изготавливать детали размером несколько метров и упрощают процесс производства цельных линейных изделий.

Группа Damen Shipyards вошла в совместный консорциум с RAMLAB, Promarin, Autodesk, Бюро Веритас и разработала первый класс утвержденных гребных винтов. Ранняя работа по производству первого в мире винта WAAM в 2017 г. была прекращена [8]. Она была основана на дизайне Promarin, обычно встречающийся на буксире Damen Stan типа 1606 (рис. 5).

**Стоимость оборудования.** Технология порошкового осаждения требует организации системы, включающей лазерный или электронно-лучевой источник тепла, компьютерное оборудование для числового управления и устройство дозирования порошка. Типичная стоимость производственной системы составляет 750000 дол. Система с осаждением проволоки со стандартным оборудованием для дуговой сварки в сочетании с шарнирным роботом с 5 осями, обходится в 120000 дол. [9]

**Стоимость расходных материалов.** В настоящее время доступно только ограниченное количество металлических сплавов для аддитивного производства с использованием порошков, в основном это сплав Ti-6Al-4V, некоторые нержавеющие стали, Inconel 625/718 и Al-Si-10Mg. Стоимость порошков многих нержавеющих сталей находится в районе 400 долл./кг. Гораздо меньше проблем, когда дело доходит до процесса сварки плавлением. Существует широкий спектр сварочных проволок, большинство из которых можно использовать для осаждения дугой. Из-за большого количества производимых проволок ее стоимость не столь высока. Как правило, присадочная проволока из нержавеющей стали легко доступна по цене 30 долл./кг.



Рис. 5. Бронзовый винт 1300 мм, 180 кг

Сравнение производства «проволока + дуга» (WAAM) и «луч + порошок» (DMLS/DMEBS)

Присадочные металлы	WAAM	DMLS/DMEBS
	Широкий выбор. Все стандартные присадочные проволоки легко доступны	Ограничен выбор. Порошки, как правило, должны быть специально изготовлены
Стоимость присадочных материалов	Низкая	Высокая
Стоимость оборудования	Низкая. Стандартное оборудование для дуговой сварки с газовой защитой	Высокая. Специальное высокоточное оборудование
Скорость осаждения	Высокая, 10 кг/ч	Низкая, 0,1 кг/ч
Применение	Большие и тяжелые детали массой свыше 5 кг и размером более 460 мм	Мелкие и легкие детали с высокой точностью: протезы и компоненты аэрокосмической техники
Прочность	Как правило на уровне исходного материала	Доступная информация ограничена, но в общем хорошая
Преимущества/недостатки	Низкая стоимость После нанесения часто необходима механическая обработка	Высокая стоимость. Точное нанесение позволяет получать почти готовые детали

**Скорость осаждения.** Скорость осаждения порошка очень низкая и составляет в среднем 0,1 кг/ч. С развитием технологий она может существенно увеличиваться, но в настоящее время это сильно ограничивает применение. В процессе «проволока + дуга» производительность составляет 10 кг/ч для широкого спектра металлических сплавов (таблица).

**Ограничения процесса.** Многие сплавы могут быть использованы во время процесса WAAM при использовании в качестве защиты инертного газа сварочной горелки. Однако некоторые материалы гораздо более склонны к взаимодействию с остаточным кислородом, и это может привести к поверхностному окислению. Титановые сплавы особенно чувствительны, но нержавеющая сталь и многие низколегированные стали также требуют дополнительной защиты инертным газом.

При электронно-лучевом процессе обеспечивается защита, поскольку операции выполняются в вакууме. Тем не менее, это дорогая альтернатива дуговой сварке.

**Преодоление проблемы загрязнения кислородом.** Проблема адекватной защиты была решена путем разработки гибких корпусов, которые могут продуваться инертным газом, обычно аргоном. Они могут вместить все сварочное оборудование и робот и обеспечить защиту инертного газа в течение всего процесса осаждения.

**Гибкая технология корпусов.** С момента появления концепции были достигнуты значительные успехи в разработке корпусов еще более двух десятилетий назад. Например, Huntingdon Fusion Techniques Ltd [10] возглавил кампанию по разработке системы специально для сварочной промышленности. Эти инновационные продукты предлагают значительную привлекательность как альтернативу вакууму и «перчаточному ящику», не в последнюю очередь значительно снижающую стоимость.



Рис. 6. Небольшая гибкая система. Интерфейс робот/корпус эффективно защищен от утечек, используя адаптируемое замыкание. Шкафы объемом до 27 м<sup>3</sup> были изготовлены для размещения больших систем

Самый большой объект на сегодняшний день составляет 27 м<sup>3</sup>, достаточный для размещения всех заготовок, сварочного оборудования и даже программируемой роботизированной системы. Корпус продувается инертным газом, содержание кислорода достаточно низкое, чтобы предотвратить окисление во время сварки и охлаждения.

**Мониторинг содержания кислорода.** Контроль и мониторинг в реальном времени содержания кислорода в продувочном газе имеет решающее значение. Методы измерения содержания кислорода были доступны в течение десятилетий, но только недавно были разработаны специальные инструменты для сварки. Пользователи все чаще требуют полного отсутствия изменения цвета осаждаемого металла и потери коррозионной стойкости, что подразумевает продувку систем. Содержание кислорода в газе должно составлять всего 20 частей на миллион (0,002 %). Очень немногие мониторы продувки кислородом способны соответствовать этой чувствительности, но инструменты PurgEye (рис. 7) удовлетворяют всем требованиям.





Рис. 7. Небольшая гибкая система. Усовершенствованный монитор кислорода включает цветной сенсорный экран-контроль. Прибор поддерживает регистрацию данных и сертификацию сварных швов. Показания точны до 10 промилле

**Заключение.** Основным преимуществом 3D печати является то, что она открывает возможности для производства изделий со сложным дизайном, в противном случае это не может быть практичным или экономичным решением. С точки зрения применений для WAAM и DMLS/DMEBS сварочная версия наиболее подходит для более тяжелых и крупных продуктов, в то время как по-

рошковая альтернатива лучше всего применяется там, где изделия небольшие и сложные по форме.

Многие сплавы должны быть защищены от загрязнения во время операции сварки. Формирование оксидов металлов может снизить коррозионную стойкость и повлиять на механические свойства. Использование эффективной бескислородной среды инертного газа имеет важное значение.

### Список литературы

1. Cancer patient receives first 3D printed sternum and rib cage. Orthopaedics and Spine, July 2017.
2. Direct metal laser sintering, Bertol et al, Materials & Design, 2010.
3. Laser-Based Additive Manufacturing Processes. Woodhead Publishing, 2018.
4. World's first class approved 3D printed propeller. International Institute of Marine Surveying, May 2017.
5. Design for Wire and Arc Additive Layer Manufacture. Mehnen et al. 20th CIRP Design Conference, Nantes April 2010.
6. Wire & Arc Additive Manufacturing. Williams et al, Materials Science & Technology 2016 Vol 32.
7. Williams S. WAAM Current and Future Developments. Additive Manufacturing for Aerospace, Defence and Space conference. London, March 2016.
8. Damen shipyards release further details about world's first 3D printed propeller. 3D Printing Industry. September 2017.
9. Wire+arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison. Martina F.
10. Huntingdon Fusion Techniques Ltd, UK.

М. Флетчер (по материалам «White Paper»)

## НОВЫЙ ПРОЕКТ В ОБЛАСТИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

С апреля 2017 г. Санкт-Петербургский государственный морской технический университет является головным исполнителем в России крупного комплексного проекта в сфере аддитивных технологий — «Создание производства точных крупногабаритных заготовок из высокопрочных и жаростойких сплавов на основе гибридных ми-

крометаллургических процессов формообразования для перспективных двигателей авиационно-космической, наземной и морской техники».

Для создания высокотехнологичного производства в СПбГМТУ разрабатывается технологический процесс прямого лазерного выращивания точных титановых заготовок с размером до 2,1 м.

