

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.

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.

В одном случае используют 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 методика наиболее эффективно применяется там, где требуется изготовить небольшие, delicate предметы. Примером является производство имплантатов [1–3].

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

По сравнению с применением процессов WAAM и DMLS/DMEBS, сварочная версия наиболее подходит для производства более тяжелых и крупных конструкций, в то время как порошковая — для получения более мелких со сложной формой изделий. Другими словами, сварка — это, по сути, метод объемного наращивания, а исполь-

зование порошка — точный и строго контролируемый процесс.

Примеры производства WAAM. Несколько достижений в области 3D производства были получены и уместно проиллюстрировать их достижения применительно к судостроению (рис. 1–4).

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

Текущая активность. Аддитивный метод изготовления изделий имеет несколько преимуществ, таких как значительное сокращение потерь материала, особенно при производстве многих разнообразных деталей, и способность быстро создавать большой ассортимент изделий для опытных работ.

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 ограничений и стоимости, 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 для производства авиационных двигателей. Исследователями разработан процесс осаждения

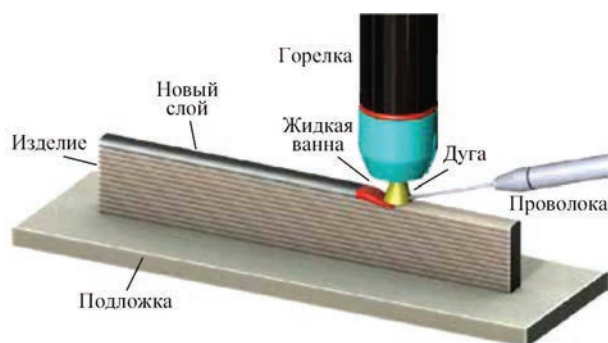


Рис. 1. Иллюстрация процесса WAAM



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



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

«проволока + дуга» для изучения возможности использования в качестве конструкционных материалов инконеля, титана, алюминия и различных никелевых сплавов. С тех пор акцент сместился на изготовление планеров. Хотя метод «лазер + порошок» активно применяется для быстрого прототипирования или получения очень небольших и сложных деталей, эта технология имеет ограничения из-за своей низкой скорости и размеров компонентов, которые нужно точно изготовить. Напротив, процессы, разрабатываемые в университете Крэнфилд, рассчитаны на высокие скорости осаждения. Центр Крэнфилда в настоящее время нацелен на уровень осаждения 10 кг/ч, по сравнению с обычным 0,1 кг/ч, используя «лазер + порошок», при котором может 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 встречающегося на буксире Damen Stan типа 1606 (рис. 5).

Стоимость оборудования. Типичная стоимость производственной системы составляет 750000 дол. США Система с осаждением проволоки со стандартным оборудованием для дуговой сварки в сочетании с шарнирным роботом с 5-ю осями обходится в 120000 дол. США [9].

Стоимость расходных материалов. В настоящее время доступно только ограниченное количество металлических сплавов для аддитивного производства с использованием порошков, в ос-

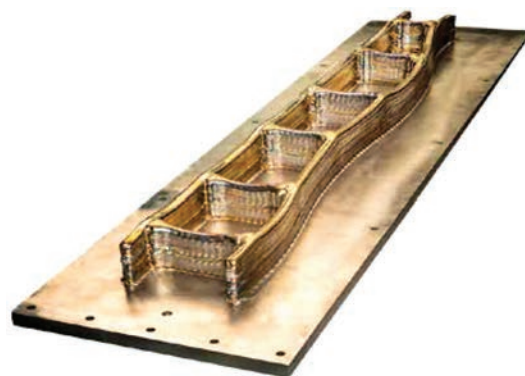


Рис. 4. Основной конструктивный элемент крыла самолета

новном это сплав Ti-6Al-4V, некоторые нержавеющие стали, Inconel 625/718 и Al-Si-10Mg. Стоимость порошков многих нержавеющих сталей находится в районе 400 дол./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 дол./кг.

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. 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.



Рис. 5. Бронзовый винт (1300 мм, 180 кг)

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

Присадочные материалы	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 детали 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

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 компанию по разработке системы специально для сварочной промышленности. Эти инновационные продукты предлагают значительную привлекательность как альтернативу вакууму и «перчаточному ящику» значительно снижающему стоимость.

Самый большой объект на сегодняшний день составляет 27 м³, 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 разработаны специальные инструменты для сварки. Пользователи все чаще требуют полного отсутствия изменения цвета осаждаемого металла и потери коррозионной стойкости, что подразу-

мевает продувку систем. Содержание кислорода в газе должно составлять всего 20 частей на миллион (0,002 %).

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 применения WAAM и DMLS/DMEBS, сварочная версия наиболее подходит для тяжелых и крупных продуктов, в то время как порошковая лучше всего применяется там, где изделия небольшие и сложные по форме.

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

Список литературы

- (2017) Cancer patient receives first 3D printed sternum and rib cage. *Orthopaedics and Spine*, July.
- Bertol et al. (2010) Direct metal laser sintering. *Materials & Design*.
- (2018) Laser-based additive manufacturing processes. Woodhead Publ.
- (2017) World's first class approved 3D printed propeller. *Int. Institute of Marine Surveying*, May.
- Mehnen et al. (2010) Design for wire and arc additive layer manufacture. *20th CIRP Design Conf., Nantes, April 2010*.
- Williams et al. (2016) Wire & arc additive manufacturing. *Materials Science & Technology*, **32**.
- Williams, S. (2016) WAAM current and future developments. Additive manufacturing for aerospace. *Defence and Space Conf., London, March*.
- (2017) Damen shipyards release further details about world's first 3D printed propeller. *3D Printing Industry*, September.
- Martina, F. *Wire + arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison*.
- Huntingdon Fusion Techniques Ltd, UK.

М. Флетчер (по материалам «White Paper»)