

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТЕНКИ НАПЕЧАТАННОЙ НА 3D-ПРИНТЕРЕ

Кузнецов М.А.^{1,a}, Крампит М.А.^{1,b}, Данилов В.И.^{2,c}, Шляхова Г.В.^{2,d}

¹Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Юрга, Россия

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

^akuznechik_85@mail.ru, ^bsavage_jawa@mail.ru, ^cdvi@ispms.tsc.ru, ^dshgv@ispms.tsc.ru

В современной промышленности все более актуальным становится изготовление металлических изделий сложной формы при помощи аддитивных технологий. Реализация процесса изготовления возможна за счет применения электродуговой наплавки [1, 2]. Наплавка концентрированным источником энергии при высокой производительности процесса, позволяет реализовать принцип аддитивного производства, а именно послойного формирования объемных конструкций [3, 4]. Получение металлических изделий наплавкой происходит за счет плавления порошка или проволоки [5].

Для проведения экспериментальных исследований было произведено электродуговое послойное выращивание плавящимся электродом с использованием разработанного 3D-принтера. В качестве электрода использовалась сварочная проволока марки св08Г2С диаметром 1,2 мм. Послойное выращивание осуществлялось на подложке из стали Ст6сп.

Электродуговое послойное выращивание происходило по следующей технологии. Создавалась компьютерная 3D модель изготавливаемого изделия посредством CAD систем, которая в дальнейшем разбивалась на слои. Формирование объекта производилось на 3D-принтере при следующих режимах: сила тока 120-140А, напряжение 22-24В, скорость выращивания 300 мм/мин. В качестве источника питания применялся инверторный выпрямитель. Слои формировались на подвижном столе, обеспечивающем точное перемещение по заданной траектории по координатам X, Y и движущейся горелки, обеспечивающей точное позиционирование по координате Z в результате плавления проволоки и подплавления поверхности подложки или предшествующего слоя. За один проход наплавлялся слой толщиной от 3 до 6 мм в зависимости от режимов наплавки. Изображение металлической стенки, полученной данным методом, представлено на рисунке 1.



Рисунок 1. Неподдерживаемая вертикальная стенка

Изделие было сформировано путем наплавки четырех последовательных слоев. Из него был приготовлен темплет толщиной 2,5 мм. Так как основной целью настоящей работы являлись структурные исследования металла наплавленной конструкции, из темплета были вырезаны образцы для изготовления металлографических шлифов. Шлифы были выполнены в направлении движения дуги и в перпендикулярном направлении. На шлифах помимо структурных исследований производились измерения микротвердости. Использовались оптический микроскоп Neophot-21 с записью изображений при помощи цифровой камеры Genius Vileacam и микротвердомер ПМТ-3М.

Анализ результатов металлографии показал, что каждый из наплавленных слоев имеет структуру с разными размерами и морфологией зерен. Слой 4, наплавленный последним и непосредственно примыкающий к свободной поверхности, имеет структуру литого металла, состоящую из разориентированных сильно ветвящихся дендритов. Влияние направления наплавки не сказывается. Толщина этого слоя не превышает 4 мм. Все наплавленные слои 3, 2, 1 имеют полиэдрическую перекристаллизованную мелкозернистую феррито-перлитную структуру. В слое 3 толщиной ≈ 3 мм размер ферритного зерна соответствует номеру 9 и составляет $18,4 \pm 6,2$ мкм в продольном шлифе и $16,4 \pm 8,7$ мкм в поперечном. Видно, что это различие незначимо. Содержание перлита соответствует химическому составу сварочной проволоки Св08Г2С. В нижележащем слое 2, где перекристаллизация произошла дважды, размер ферритного зерна соответствует номеру 10 и фактически одинаков и в продольном и в поперечном шлифах ($13,4 \pm 6,9$ мкм и $12,7 \pm 6,6$ мкм, соответственно). По фазовому составу структура тоже соответствует стали Св08Г2С. Еще мельче зерно в слое 1, где, по-видимому, произошло частичное перемешивание с подложкой ($9,6 \pm 3,6$ мкм в продольном шлифе, $7,3 \pm 3,7$ мкм в поперечном, номер 11). Здесь содержание перлита выше, чем в стали Св08Г2С, но меньше, чем должно быть в стали Ст6сп. Таким образом, наплавленный металл имеет градиентное строение с экспоненциально возрастающим размером зерна по мере удаления от подложки. Измерения микротвердости ожидаемо показали, что чем меньше размер зерна, тем больше твердость слоя. Так микротвердость слоя 1 составляет 1770 МПа, а слоя 4 – 1370 МПа.

Выводы. Установлено, что при электродуговом послойном выращивании стенки изделий имеют градиентное строение. Дендритную структуру имеет только последний наплавленный слой. Нижележащие слои подвергаются вторичной термообработке за счет тепловыделения верхнего слоя. В результате этого по мере перехода от 4 к 1 слою средний размер ферритного зерна уменьшается в два раза, а микротвердость, наоборот, увеличивается в полтора раза.

Исследование выполнено в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, направление III.23.1.2 и при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00036.

Список литературы

1. В.В. Жуков, Г.М. Григоренко, В.А. Шаповалов Аддитивное производство металлических изделий (обзор) // Автоматическая сварка.– 2016. – № 5-6. – С. 148-153.
2. В.Н. Коржик, В.Ю. Хаскин, В.И. Ткачук, С.И. Пелешенко, В.В. Коротенко, А.А. Бабич Трехмерная печать металлических объемных изделий сложной формы на основе сварочных плазменно-дуговых технологий // Автоматическая сварка.– 2016. – № 5-6. – С. 127-134.
3. D.H. Ding, Z.X. Pan, D. Cuiuri, H.J. Li Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – Oct. 2015. – P.465-481.
4. K.M. Taminger, R.A. Hafley Electron beam freeform fabrication for cost effective near-net shape manufacturing // 139 specialists meeting on cost effective manufacture via net shape processing. Amsterdam (The Netherlands): NATO. – 2006. – P.16.1-16.10.
5. K.F. Garff, M. Short, M. Norfolk Very high power ultrasonic additive manufacturing (vhquam) for advanced materials // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA. – 2010. – P.82-89.