

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО СПЛАВЛЕНИЯ.

*М. Ци, аспирант гр. А1-21,
Н.В. Мартюшев, доц.,
В.Н. Козлов, к.т.н., доц.,
Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30
тел.(3822)-606-389
E-mail: kozlov-viktor@bk.ru*

Электронно-лучевая плавка проводится в вакуумных рабочих камерах, который позволяет избежать окисление металла и образование пористости. В отличие от лазерных и дуговых технологий, электронный пучок обладает более высоким КПД. Благодаря хорошей коррозионной стойкости, высокой прочности и жаропрочности мартенситная нержавеющая сталь широко используется для изготовления лопаток турбин, валов, режущий инструмент, хирургических инструментов и пружины для работы до 400-450°C.

В работе Węglowski M.S. [1] было обнаружено, что при постоянном ускоряющем напряжении и токе луча, увеличение диаметра проволоки проводит к уменьшению высоты швов и увеличению ширины швов, а увеличение скорости сканирования – наоборот.

По мере увеличения высоты конструкции, скорость охлаждения уменьшается, что приводит к увеличению размера зерна и снижению твердости [2, 3]. Из закона Холла - Петча следует, что размер зерна влияет на прочность материала. По сравнению с традиционными производствами аддитивные технологии (АТ) имеют сложную термическую историю, включая многократные быстро повторяющиеся нагрев и охлаждение. Во время процесса формирования слой, расположенные ближе к верхнему слою, нагреваются выше температуры аустенитного превращения, так что ранее образовавшийся мартенсит повторно превращается в аустенит. Увеличение содержания аустенита также приводит к снижению твердости мартенситной нержавеющей стали 40X13 [4, 5, 6].

Для обеспечения высокой скорости охлаждения применяются следующие методы: 1) повышение междуслойного времени пребывания; 2) дополнительные системы охлаждения; 3) уменьшение подаваемой энергии при послойном синтезе [3, 4, 5, 7].

С точки зрения затвердевания, скорость охлаждения материала при использовании технологии проволочного дугового наплавления (WAAM) намного ниже, чем при

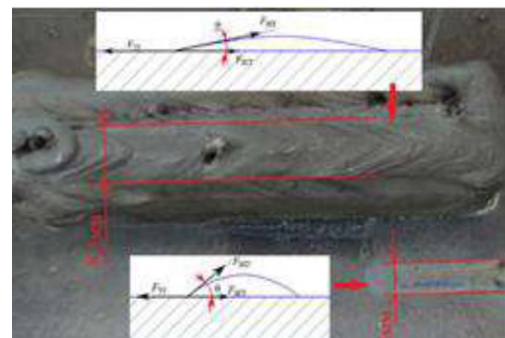


Рис. 1. Схема действия сил поверхностного натяжения на разных участках шва ;

использовании лазерной АТ (10^3 - 10^8 К/с) или электронно-лучевой АТ(10^3 - 10^4 К/с) [4, 5].

Уравнение Юнга для угла смачивания θ :

$$\cos \theta = (F_{ТГ} - F_{ТЖ})/F_{ЖГ}$$

где θ , $F_{ТГ}$, $F_{ТЖ}$, $F_{ЖГ}$ соответственно угол смачивания, сила поверхностного натяжения на границе подложка/опора, сила поверхностного натяжения на границе подложка/ванна, сила поверхностного натяжения жидкости. Силы $F_{ТГ}$ и $F_{ЖГ}$ мало зависят от температуры, поэтому можно считать их постоянными.

Поверхностное натяжение обратно пропорционально активности жидкой плавильной ванны, и активность жидкости увеличивается с повышением температуры. По мере увеличения высоты выращивания происходит накопление тепла, в то же время температура предыдущего слоя повышается. По этой причине ширина (8,5 мм) 19-го слоя больше чем ширина (5мм) первого слоя. Уменьшения угла смачивания негативно влияет на точности формирования, которая приводит к увеличению времени последующей механической обработки.

Когда проволока почти соприкасается с поверхностью расплавленной ванны как расплавленно-металлический мост, сварной шов имеет хороший внешний вид. По мере увеличения высоты H внешний вид шва становится плохим из-за струи паров металла (рис. 2) [7, 8].

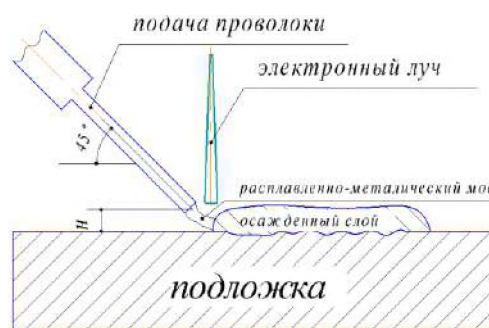


Рис.2. Принцип электронно-лучевой наплавки проволоочной аддитивной технологии

В таблице 2 представлены основные технологические параметры при вертикальной и горизонтальной схемах наплавки.

Таблица 1 – Основные технологические параметры при вертикальной и горизонтальной наплавке

Технологические параметры печати	Схема наплавки	
	вертикальная	горизонтальная
Ускоряющее напряжение (кВ)	40	40
Ток луча (мА)	21	33
Подача проволоки по дуге (мм/мин)	1050	700
Подача проволоки по прямой линии (мм/мин)	900	600
Скорость формирования ($м^3/ч$)	$6,9 \times 10^{-5}$	$4,16 \times 10^{-5}$
Плотность энергии ($Дж/мм^3$)	45,17	114,12
Удельная энергия ($Дж/мм$)	53,64	129,1

Как следует из таблицы 1, вертикальные детали по сравнению с горизонтальными могут быть напечатаны с меньшей подаваемой энергией, более высокой скоростью подачи проволоки и высокой скоростью формирования. Кроме того, из значения средней плотности энергии мы можем сделать вывод, что скорость охлаждения горизонтальной детали должна быть больше, чем скорость охлаждения вертикальной детали.

Список литературы

1. Węglowski M. S. et al. Electron beam additive manufacturing with wire—analysis of the process //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2018. – Т. 1960. – №. 1. – С. 140015.
2. Lopes J G, Machado C M, Duarte V R, et al. Effect of milling parameters on HSLA steel parts produced by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 739-749.
3. Zhang H, Xie Y, Rui D, et al. Hybrid deposition and micro rolling manufacturing method of metallic parts[C]//2013 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin, 2013.
4. Kazemipour M. et al. On the microstructure and corrosion behavior of wire arc additively manufactured AISI 420 stainless steel //TMS 2020 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. – Springer, Cham, 2020. – С. 435-448.
5. Ge J. et al. Characterization of wire arc additive manufacturing 2Cr13 part: Process stability, microstructural evolution, and tensile properties //Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Т. 748. – С. 911-921.
6. Krakhmalev P. et al. In situ heat treatment in selective laser melted martensitic AISI 420 stainless steels //Materials & Design. – 2015. – Т. 87. – С. 380-385.
7. Zhao J. et al. Effects of metal-vapor jet force on the physical behavior of melting wire transfer in electron beam additive manufacturing //Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Т. 220. – С. 243-250.
8. Fuchs J., Schneider C., Enzinger N. Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source //Welding in the World. – 2018. – Т. 62. – №. 2. – С. 267-275.