

**ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНОЙ
АДДИТИВНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Д.А. Гурьянов^{1,2}, К.Н. Калашников², В.Р. Утяганова²

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. С.Н. Кульков^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

²Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634021

E-mail: desa-93@mail.ru

**FORMATION OF METALLIC COMPONENTS BY WIRE FEED ELECTRON BEAM ADDITIVE
MANUFACTURING METHOD**

D.A. Gurianov^{1,2}, K.N. Kalashnikov², V Utyaganova²

Scientific Supervisor: Prof., Dr. S.N. Kulkov

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

²Institute of Strength Physics and Materials Science, Russia, Tomsk, pr. Akademicheskii, 2/4, 634021

E-mail: desa-93@mail.ru

***Abstract.** Investigation of the macro- and microstructure of metallic (Ni-based and Ti-based alloys) samples obtained by the method of wire feed electron beam additive manufacturing has been carried out. The results of the research show that grains (for titanium) and dendrites (for nickel) grow epitaxial in the direction of temperature gradient. Furthermore, it was revealed that directional solidification occurs only in bulk of samples due to nondirectional dissipation of heat on the edge of the sample.*

Введение. Аддитивные технологии – это метод получения изделий по их трехмерным моделям, путем послойного формирования структуры материала. Аддитивные технологии классифицируют по типу используемого материала (порошок или проволока) и тепловому источнику (лазер, электронный луч, дуговой источник). Исходным материалом могут служить металлы, полимеры, керамика и композиты. Процесс аддитивного производства характеризуется локальным послойным выращиванием материала за счет чего создается монолитное изделие. Наиболее важными условиями для получения прочного изделия являются гомогенность плавления и кристаллизации материала. Процесс послойного выращивания – это сложная система тепло- и массопереноса, что, как правило, приводит к появлению дефектов, таких как растрескивание в процессе кристаллизации, расслоение и образование пор из-за не полного расплавления и деформации, обусловленных рабочей температурой и различием коэффициентов теплового расширения материала проволоки и подложки [1]. Для всех типов аддитивного производства наиболее важным параметром процесса кристаллизации является геометрия ванны расплава, которая в свою очередь зависит от плотности энергии, скорости процесса выращивания, скорости подачи филамента (в случае проволочной технологии). Подбор оптимальных параметров необходим для получения изделий с механическими свойствами, сопоставимыми или превосходящими свойства изделий, полученными традиционными методами.

В связи с тем, что микроструктура материала оказывает определяющее влияние на механические свойства материалов, её контроль и оптимизация представляют собой актуальную проблему [2]. И целью настоящего исследования было выявление особенностей формирования макро- и микроструктуры материала металлических изделий, полученных методом проволочной аддитивной электронно-лучевой технологии.

Экспериментальная часть. Исходным (наплавочным) материалом служили филаменты в виде проволоки из титанового сплава ВТ6 и прутков жаропрочного никелевого сплава ЖС6У. Формирование изделий, имеющих форму вертикальных стенок, происходило в вакууме с заданными значениями ускоряющего напряжения (25-35 кВ), тока пучка электронов (30-50 мА) и частоты развертки электронного пучка (1000 Гц). Стенка титанового сплава состояла из 20 слоев при высоте 23 мм. Стенка никелевого сплава состояла из 16 слоев и имела высоту 19 мм. Для исследования макро- и микроструктуры материала стенок, изготавливались продольные и поперечные полированные и травленные металлографические шлифы. Шлифы изделий из сплава ЖС6У травили в растворе Марбле, длительность 10 с. Шлифы изделий из сплава ВТ6 травили в растворе Кролла в течении 15 с. Металлографические исследования проводили на лазерном конфокальном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS 4100. Микроструктуру изучали при помощи растрового электронного микроскопа LEO EVO 50.

Результаты. Макроструктура материала стенки из титанового сплава в продольном сечении, представлена на рисунке 1. Как видно на рисунке, эпитаксиальный рост столбчатых зерен происходит практически по всей длине стенки, концентрация зерен, близких по форме к равноосной, увеличивается по мере приближения к краям образца. Данное явление можно объяснить тем, что у границы каждого из наплавляемых слоев происходит всестороннее рассеяние тепла, в том числе за счет радиационного охлаждения. В нижних же слоях радиационная составляющая охлаждения вносит меньший вклад. В этом случае направление отвода тепла сонаправлено с температурным градиентом к подложке, из-за чего формируются столбчатые зерна. В [3] приводятся зависимости морфологии зерен и микроструктуры от соотношения величины температурного градиента (G) к скорости кристаллизации (R). Так, по мере уменьшения значения G и увеличения значения R морфология микроструктуры меняется в следующем порядке: планарная, ячеистая, ячеистые дендриты, столбчатые дендриты, равноосные (для сплавов на основе титана: столбчатые, смешанные, равноосные зерна). Исходя из этого, можно предположить, что во вновь нанесенных слоях при $G/R < 1$, аналогичное соотношение справедливо для краев выращенной стенки. Направленный рост зерен происходит при $G/R > 1$. Столбчатые зерна имеют среднюю длину $16,07 \pm 4,63$ мкм и ширину $2,39 \pm 0,77$ мкм. Зерна с морфологией близкой к равноосной имеют средний диаметр $0,86 \pm 0,29$ мкм.

Изображения микроструктуры жаропрочного никелевого сплава ЖС6У представлены на рисунке 2. Анализ всей площади поперечного сечения стенки показывает, что на границе с подложкой находится тонкий слой с зернами равноосной формы, а затем начинается рост дендритов в направлении аддитивного выращивания. Растут дендриты в одном направлении группами по 5-30 штук, разница в направлении роста групп может достигать 90° . Как и в случае с титаном по мере приближения к краю, морфология структуры переходит от направленной к равноосной. Такой же переход можно наблюдать на границе слоев. На СЭМ изображениях сплава ЖС6У можно выделить такие структуры как дендритные области, междендритные области без и с выделением γ/γ' эвтектики. Элементный анализ говорит о

пониженном содержании Al и Ti в дендритах и повышенное содержание Co. Тогда как в γ/γ' эвтектике выявляется повышенное содержание Ti, W и Nb.



Рис. 1. Макроструктура материала в продольном сечении титановой стенки, полученной методом проволочной аддитивной электронно-лучевой технологии

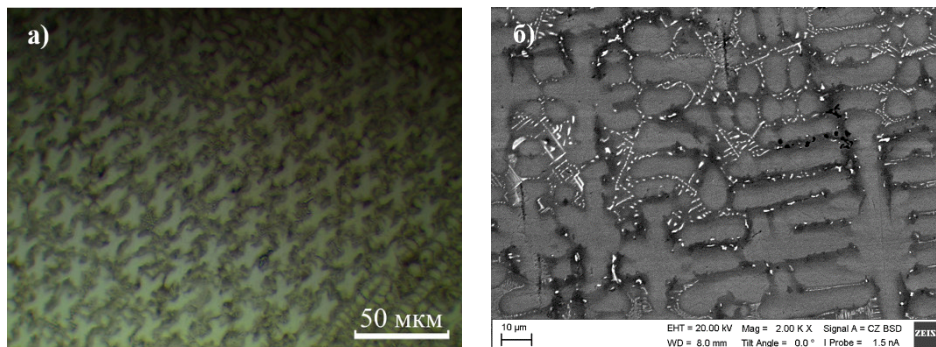


Рис. 2. Микроструктура стенки из сплава ЖС6У, полученной методом проволочной аддитивной электронно-лучевой технологии. Металлографическое изображение поперечного травленого шлифа – а, СЭМ изображение поперечного полированного шлифа - б

Заключение. Были исследованы макро- и микроструктура изделий из сплавов ВТ6 и ЖС6У, полученных методом проволочной аддитивной электронно-лучевой технологией. Результаты исследования показывают, что зерна β -фазы титана и дендриты в никелевом сплаве растут эпитаксиально в направлении температурного градиента через слои. Кроме того, было показано, что направленная кристаллизация происходит только в объеме образцов. Причиной данного эффекта является ненаправленное всестороннее рассеяние тепла на границе образца, в том числе за счет радиационного охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vastola G., Zhang G., Pei Q.X., Zhang Y.W. Modeling and control of remelting in high-energy beam additive manufacturing // Additive Manufacturing. – 2015. – V. 7. – P. 57–63.
2. Sahoo S., Chou K. Phase-field simulation of microstructure evolution of Ti–6Al–4V in electron beam additive manufacturing process // Additive Manufacturing. – 2016. – V. 9. – P. 14–24.
3. Karimi P., Sadeghi E., Åkerfeldt P., Ålgårdh J., Andersson J. Influence of successive thermal cycling on microstructure evolution of EBM-manufactured alloy 718 in track-by-track and layer-by-layer design // Materials and Design. – 2018. - V. 160. - P. 427-441.