

УДК 620.184.3

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ МАТЕРИАЛА ИЗДЕЛИЯ ИЗ СПЛАВА ЖС6У,
СФОРМИРОВАННОГО МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ
АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Д.А. Гурьянов^{1,2}, К.С. Осипович¹, А.В. Воронцов¹.

Научный руководитель: профессор, д.т.н. Е.А. Колубаев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, Академический пр., 2/4, 634055

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

E-mail: desa-93@mail.ru

**STRUCTURAL-PHASE MATERIAL COMPOSITION OF ZHS6U ALLOY PRODUCT FORMED
BY WIRE-FEED ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING**

D.A. Gurianov^{1,2}, K.S. Osipovich¹, A.V. Vorontsov¹.

Scientific Supervisor: Prof., Dr. E.A. Kolubaev

¹Institute for Physics of Strength and Material Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,

Russia, Tomsk, 2/4 Akademicheskii ave., 634055

²Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, 30 Lenina str., 634050

E-mail: desa-93@mail.ru

***Abstract.** In the present work, a product of ZhS6U alloy was obtained by wire-feed electron-beam additive technology on a substrate of austenitic steel. The obtained product had the shape of a thin wall and contained 20 layers and was 4.5 cm high, had no surface macro-defects and deviations from the specified geometry. The structure of the material was represented by dendrite colonies growing epitaxially in the direction of additive growth with deviation in the direction of the electron beam motion. It is shown that in the material of the additive product there is a tenfold refinement of the structure and the main strengthening phases, compared to the raw cast material. Also, studies have shown that the foreign substrate material has no crystallographic effect on the product being formed, and its submergence is already leveled at 5 mm.*

Введение. Жаропрочные сплавы на основе никеля являются востребованным материалом в авиационном двигателестроении благодаря своим свойствам: длительной прочности, сопротивлению коррозии и ползучести при высоких температурах. В настоящее время изделия из подобных сплавов стараются получать с направленной или монокристаллической структурой методами Бриджмена-Стогбаргера и литьем с жидкометаллическим охладителем. С развитием аддитивных технологий появилась возможность заменить многоэтапный традиционный процесс отливки сложных и ответственных изделий. Аддитивные технологии призваны уменьшить объемы отходного дорогостоящего материала, а также сократить время производства деталей из жаропрочных сплавов. Подходы и методы аддитивного производства достаточно разнообразны и имеют широкую классификацию: по тепловому источнику (лазерный луч, электронный луч, электрическая дуга), по типу

исходного материала (порошок, проволока), по способу подачи исходного материала (непосредственно в ванну расплава либо процесс формирования происходит в порошковой ванне) [1].

В последнее время появились работы, посвященные направленной кристаллизации жаропрочных сплавов методами аддитивного производства. Так выделяется два направления применения аддитивных технологий в производстве изделий их жаропрочных сплавов: залечивание дефектов в уже готовых изделиях и формирование новых изделий на подложках из аналогичных монокристаллических сплавов. В обоих случаях происходит формирование структуры аддитивного материала на поверхности монокристаллического (или направленно кристаллизованного) материала. Применение монокристаллических подложек значительно увеличивает конечную стоимость изделия. С целью её снижения в настоящей работе были применены подложки из аустенитной стали, на которых происходило формирование изделия из жаропрочного сплава ЖС6У методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии.

Экспериментальная часть. В качестве исходного материала использовался слиток сплава ЖС6У (химический состав представлен в таблице 1), из которого на электроэрозионном станке вырезались прутки. Полученные прутки после очистки от продуктов резки загружали в установку проволочного электронно-лучевого аддитивного производства, разработанную в ИФПМ СО РАН [2]. Процесс формирования тонкостенного изделия происходил в вакуумной камере на подложке из аустенитной стали 12Х18Н9Т. Основными параметрами электронно-лучевого аддитивного процесса являются ток пучка, ускоряющее напряжение, скорость перемещения рабочего столика и частота развертки электронного пучка. В ходе оптимизации параметров аддитивного процесса были выбраны следующие величины: ускоряющее напряжение – 30 кВ, скорость перемещения рабочего столика – 20 мм/мин, частота развертки – 1 кГц, ток пучка менялся динамически в зависимости от высоты изделия в диапазоне от 25 до 10 мА. Финальное изделие состояло из 20 слоев, имело высоту 4,5 см и длину 3,0 см. На поверхности не было выявлено макродефектов в виде трещин, отслоения формируемого материала от подложки и нарушений заданной геометрии.

Из полученного изделия вырезались образцы для последующих исследований структуры, фазового и элементного состава, а также их изменения по высоте методами оптической и электронной микроскопии.

Таблица 1

Химический состав сплава ЖС6У, вес. %

Fe	C	Al	Ti	Ni	Nb	Co	Cr	
до 1	0.13 - 0.2	5.1 - 6	2 - 2.9	54.3 - 62.7	0.8 - 1.2	9 - 10.5	8 - 9.5	
W	Mo	Остальное (Si, S, Mn, P, Ce, Zr, B, Pb, Bi, Y)						
9.5 - 11	1.2 - 2.4	до 0,93						

Результаты. Структура аддитивного изделия из жаропрочного сплава ЖС6У представлена дендритными колониями, растущими эпитаксиально в направлении аддитивного выращивания с отклонением в направлении движения электронного луча. По мере удаления от подложки происходит изменение морфологии, так на границе с подложкой имеется тонкий слой (порядка 40 мкм) планарной структуры (отсутствуют отдельные дендриты), затем происходит выделение дендритных осей первого порядка. Примерно на расстоянии 1 мм от подложки появляются колонии дендритов с осями второго

порядка (эта основная структура всего материала) и вблизи поверхности исчезает направленный рост и происходит формирование морфологии близкой к равноосной. Помимо изменений морфологии, также происходит увеличение расстояния между осями дендритов первого порядка (λ_1). Параметр λ_1 – является основной структурной характеристикой направленной кристаллизации и обратно пропорционален скорости кристаллизации и температурному градиенту. В данных условиях скорость кристаллизации можно принять за скорость движения рабочего стола, а так как он постоянен, то изменения λ_1 обусловлены изменениями температурного градиента. Расстояние между осями дендритов у границы с подложкой $\sim 20,1$ мкм, а у поверхности $\sim 46,0$ мкм. Исходя из соотношения [3]:

$$\lambda_1 = 134,34 \times (G \times R)^{-0,26},$$

где G – температурный градиент, $^{\circ}\text{C}/\text{см}$; R – скорость кристаллизации, $\text{мм}/\text{мин}$, были посчитаны температурные градиенты на разных высотах аддитивного изделия. Таким образом на границе с подложкой температурный градиент достигает $445,9$ $^{\circ}\text{C}/\text{см}$, а на последнем слое $18,2$ $^{\circ}\text{C}/\text{см}$.

Так как формирование изделия из сплава ЖС6У происходило на подложке из аустенитной стали, то необходимо установить, на какой высоте аддитивного изделия химический состав начинает соответствовать марочному составу. В ходе РЭМ исследования на различных высотах проводили энергодисперсионный анализ. В результате было установлено, что на высоте 5 мм и выше от подложки химический состав аддитивного изделия начинает соответствовать марочному составу сплава ЖС6У.

По средства ПЭМ и РЭМ исследований было установлено, что фазовый состав аддитивного изделия из сплава ЖС6У представлен следующими компонентами. Основные упрочняющие γ (неупорядоченный твердый раствор на основе никеля) и γ' (Ni_3Al с упорядоченной ГЦК решеткой) – фазы, карбиды типа $\text{MeC} - (\text{Ti}, \text{Nb}, \text{W})\text{C}$ и $\text{Me}_6\text{C} - (\text{Cr}, \text{Mo}, \text{W})_6\text{C}$, а также γ/γ' – эвтектикой.

Заключение. Материал изделия из сплава ЖС6У, сформированного электронно-лучевой аддитивной технологией, имел следующие отличия от исходного литого материала. Наличие направленного роста структурных элементов и их значительное измельчение (так у литого материала $\lambda_1 \sim 200$ мкм, а у аддитивного 20 – 46 мкм). В материале аддитивного изделия уменьшается объемная доля междендритного пространства, следовательно, и вторичных фаз – карбидов. Также в аддитивном материале присутствуют границы слоев и ванн расплава, где происходит еще большее измельчение вторичных фаз. Матричная γ' – фаза в аддитивном материале измельчается до десятков нанометров, в то время как в литом материале она может достигать сотен нанометров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90010

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S. // Progress in Materials Science. – 2018. – V. 92. – P. 112-224.
2. Tarasov S.Yu., Filippov A.V., Savchenko N.L. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – V. 99. – P. 2353–2363.
3. Zhang Y., Huang B., Li J. // Metallurgical and materials transactions A. – 2013. – V. 44A. – P. 1641-1644.