

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА В ОБРАЗЦЕ ИНКОНЕЛЬ 625, ПОЛУЧЕННЫМ ПО АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЕВАМ

Овчаренко В.А.¹, Бабаев А.С.², Семёнов А.Р.³

¹НИИ ТПУ, ИШНПТ, аспирант,
e-mail: vag14@tpu.ru

²Томский государственный университет, старший научный сотрудник,
e-mail: a.s.babaev@mail.tsu.ru

³Томский государственный университет, аспирант,
e-mail: artems2102@yandex.ru

Большой интерес в области аддитивного металлического производства направлен на технологии, которые в качестве сырья применяют проволоку, что значительно удешевляет производство. В качестве источника энергии могут быть применены электрическая дуга (WAAM) [1], лазер (LMD-W), электронный луч (ЕВАМ) [2]. Целью данной работы является изучение структуры и механических свойства образца из инконель 625, полученного по технологии прямого сплавления проволоки электронным лучом (ЕВАМ).

Печать заготовки, рис. 1, осуществлялась с помощью электронно-лучевой установки на базе ИФПМ СО РАН, проволокой марки OKAutrodNiCrMo-3, Ø1,2 мм, химический состав приведен в табл. 1 Печать производилась при ускоряющем напряжении 30 кВ и токе луча 60 мА. Сфокусированный луч перемещался по круговой развертке диаметром 6 мм, скорость печати 300 мм/мин.



Рис. 1. Образец, полученный по аддитивной технологии ЕВАМ

Таблица 1

Химический состав

Объект исследования и требования по стандарту	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	Fe	Nb+Ta
проволока	<0,1	<0,5	<0,5	21,5	9,0	>60	<0,4	<0,5	<0,4	<2,0	3,7
образец	<0,1	0,3	0,3	21,5	9	63,5	0,4	–	0,43	0,47	3,7
ГОСТ 5632	<0,1	<0,5	<0,5	20–23	8,0–10,0	>58	<0,4	–	<0,4	<5,0	3,15–4,15

Химический состав полученного образца не имеет отклонений от химического состава исходного материала.

Образцы для механических испытаний и исследования микроструктуры были вырезаны из центральной части заготовки на электроэрозионном станке, что позволяет не допустить нагрев металла в зоне резки. В результате были получены образцы в плоскостях ZOX (продольное сечение), ZOY (поперечное сечение). Подготовка поверхности образцов для исследования микроструктуры осуществлялась с применением алмазных паст. Неметаллические включения были рассмотрены на полированной поверхности образца, в образце присутствует микропористость. Инконель относится к однофазным сплавам, при идеальном качестве металла на травленной поверхности, структура выглядит однородной, видны границы зерен [3].

В полученном образце, рис. 2, визуализируются слои с различной микроструктурой, формирующейся в связи с разной скоростью охлаждения. В общем, структура образца дендритная, и чем выше скорость охлаждения, тем меньше размер образовавшихся дендритов, что соответствует зонам металла сформированных слоев. В переходных зонах, а также в зонах сплавления слоев проволоки, визуализируется столбчатая структура, что объясняется повторным тепловым воздействием на уже закристаллизовавшийся металл. Такое расслоение по структуре в образце приводит к неоднородности механических свойств в объеме образца, что подтверждают результаты замеров твердости, которые варьируются от 200–246 HV в областях сплавления (•) и зонах основного металла (*) соответственно

Относительное удлинение не является структурно-чувствительной характеристикой, и остается в пределах нормальных значений. Предел текучести напрямую зависит от однородности структуры и размера зерна, что объясняет низкие значения и большой доверительный интервал предела текучести по результатам испытаний, табл. 2.

Таблица 2

Результаты механических испытаний образцов

	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение, %
ZOY	640±20	144± 14	56 ± 3
ZOX	647± 80	171± 5	61± 3

Заключение

Проведена работа по изучению микроструктуры и механических свойств образцов инконель 625, полученных по технологии ЕВАМ. Формирующаяся в процессе печати слоистая структурная неоднородность приводит к низким значениям предела текучести и предела прочности. Результаты измерения микротвердости изменяются в пределах 20 %. Для корректировки характеристик образца планируется проведение термической обработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №23-79-10166 (<https://rscf.ru/en/project/23-79-10166>).

Список литературы

1. Мартюшев Н.В., Козлов В.Н., Ци М., Багинский А.Г., Хань Ц., Бовкун А.С. Фрезерование заготовок из мартенситной стали 40X13, полученных с помощью аддитивных технологий – Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 74–89. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-74-892.
2. Фёдоров В.В., Рыгин А.В., Клименов В.А., Мартюшев Н.В., Клопотов А.А., Стрелкова И.Л., Матрёнин С.В., Батрапин А.В., Дерюшева В.Н. Структурные и механические свойства нержавеющей стали, сформированной в условиях послойного сплавления проволоки электронным лучом – Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 111–124. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.4-111-124.
3. Klemm, Daniel & Beermann, Lucas & Awd, Mustafa & Walther, Frank. Mechanical and Microstructural Characterization of Arc-Welded Inconel 625 Alloy – *Materials*. – 2019. – 12. – 3690. – DOI: 10.3390/ma12223690.



Рис.2. Микроструктура образца сечение ZOX