

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО СПЛАВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ СПЛАВА INCONEL 718

Пырин Д.В., Попкова Д.С., Жильяков А.Ю.

Кафедра термообработки и физики металлов, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Российская Федерация

2017myasnikov@gmail.com, d.s.popkova@urfu.ru, a.y.zhilyakov@urfu.ru

Аннотация: Влияние различных режимов электронно-лучевого сплавления (ЭЛС) на структуру сплава Inconel 718 было изучено с помощью просвечивающей и растровой электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного фазового анализа. Установлено, что режим электронно-лучевого сплавления влияет на параметры структуры сплава Inconel 718. Определён фазовый состав сплава после разных режимов ЭЛС. Показано, что твердость сплава Inconel 718 коррелирует с плотностью энергии режима ЭЛС.

Ключевые слова: сплав Inconel 718, микроструктура, электронно-лучевая плавка, фазовый анализ, рентгеноструктурный анализ, просвечивающая электронная микроскопия, интерметаллиды.

EFFECT OF ELECTRONIC BEAM MELTING MODE ON THE STRUCTURE OF INCONEL 718 ALLOY

Pyrin D.V., Popkova D.S., Zhilyakov A.Y.

Heat Treatment and Physics of Metals Department, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

Abstract: The effect of various modes of electronic beam melting (EBM) on the structure of the Inconel 718 alloy was studied using transmission and scanning electron microscopy, as well as X-ray phase analysis. It is established that the mode of electronic beam melting affects the parameters of the structure of the Inconel 718 alloy. The phase composition of the alloy after different modes of ELS is determined. It is shown that the hardness of the Inconel 718 alloy correlates with the energy density of the ELS mode.

Key words: Inconel 718 alloy, microstructure, electronic beam melting, phase analysis, X-ray structure analysis, transmission electron microscopy, intermetallides.

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди материалов на основе никеля Inconel 718 является наиболее распространенным жаропрочным сплавом для изготовления компонентов турбин реактивных двигателей. Это связано с его высокой температурной

прочностью, устойчивостью к ползучести и высокой коррозионной стойкостью. Стремительно развивающиеся аддитивные технологии вызывают интерес и сточки зрения производства деталей из жаропрочных сплавов. В частности, проводятся исследования, направленные на разработку режимов электронно-лучевого сплавления сплава Inconel 718. Поверхность напечатанных деталей ЭЛС Inconel 718 в 100 раз грубее, чем обычно обработанные детали, что требует дополнительного этапа обработки, в частности, для повышения усталостной долговечности компонентов [1].

В структуре термообработанных образцов (нагрев 980 ± 10 °С с выдержкой в 1 ч. в среде динамического вакуума $1 \cdot 10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ мбар, охлаждение в потоке инертного газа (аргона). Старение 720 ± 10 °С, выдержка 8 часов в среде динамического вакуума $1 \cdot 10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ мбар, снижение температуры в течение 2 часов до 620 ± 10 °С с последующей выдержкой 8 ч. и охлаждением в потоке аргона) наряду с выделением интерметаллидной γ'' -фазы и небольшого количества γ' -фазы, наблюдаются частицы δ -фазы пластинчатой морфологии. Микроструктура характерна для сплава Inconel 718 в нормально термообработанном состоянии. При этом следует отметить, что упрочнение сплава Inconel 718 достигается, в основном, за счет выделения упорядоченной $\gamma''(\text{Ni}_3\text{Nb})$ – фазы с объемноцентрированной тетрагональной решёткой. Избыточная δ -фаза растёт на выделениях γ'' -фазы в виде параллельных пластин на границах зёрен и внутри них [2].

Целью настоящего исследования является исследование влияния режима ЭЛС на структуру сплава Inconel 718.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом исследования в данной работе послужил сплав Inconel 718, химический состав приведен в таблице 1. Для исследования были представлены металлические образцы из сплава Inconel 718. Аддитивный процесс выращивания образцов производилось в вакуумной среде на установке Arcam A2X EBM. Шаг штриховки 100 мкм, толщина слоя 50 мкм. Плотность энергии от электронного пучка изменялась от 250...1000 Дж/мм². Режимы ЭЛС приведены в таблице 2.

Таблица 1 Химический состав исследуемого сплава [6]

Содержание химических элементов, масс. %														
Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Co	Mn	C	Si	P	Cu	Si	B	Fe
50,0...55,0	17,0...21,0	4,75...5,50	2,80...3,30	0,65...1,15	0,20...0,80	1,0	0,35	0,08	Не более				0,006	Ост.
									0,35	0,015	0,30	0,015		

Таблица 2 Режимы ЭЛС образцов из сплава Inconel 718

№ режима	Ток пучка, мА	Скорость сканирования, мм/с	Напряжение, кВ	Толщина слоя, мкм	Плотность энергии, Дж/мм ³
1	10	2400	60	50	250
2	10	1500			400
3	10	600			1000
4	18	2400			450

Металлографический анализ выполнялся с использованием двулучевой электронно-ионной рабочей станции ThermoFisher Scios 2 и растрового электронного микроскопа Jeol «JSM-6490 LV» с приставкой для микроанализа InkaEnergyTEM 350.

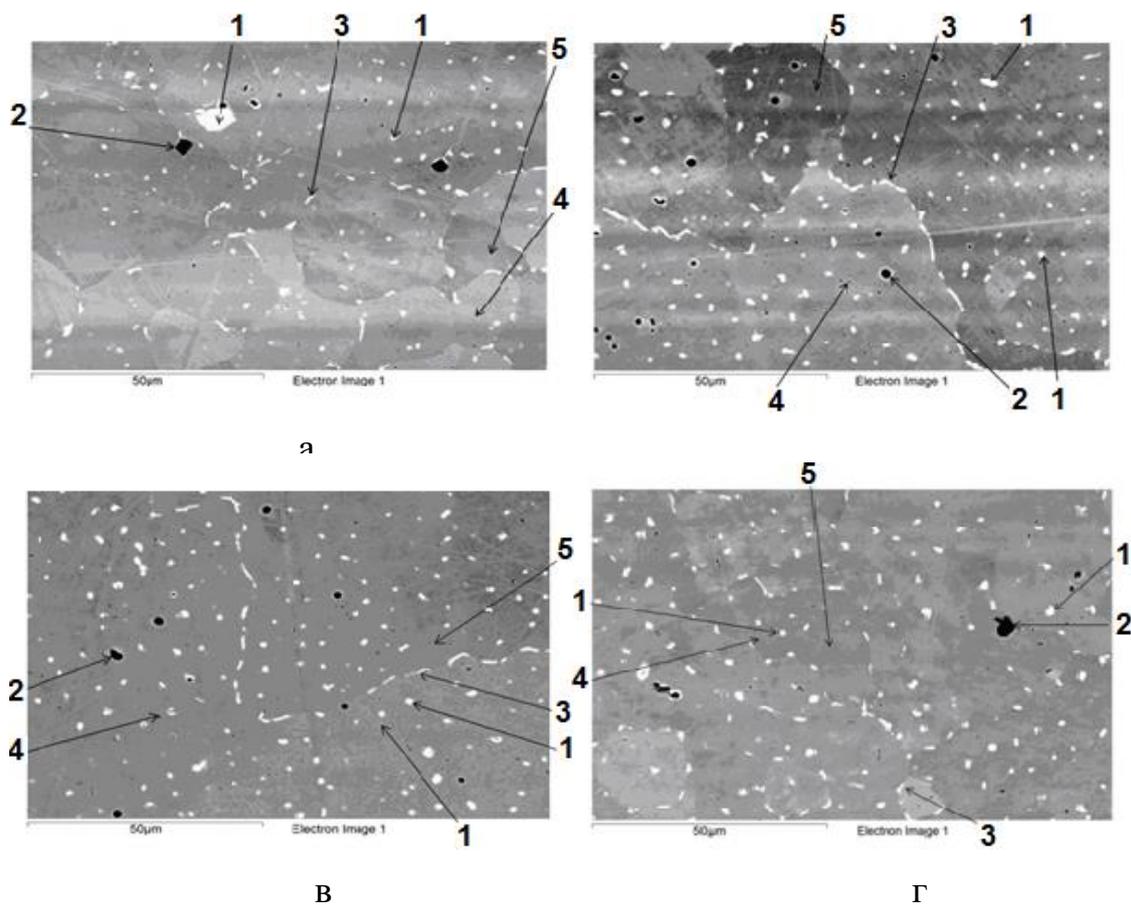
Рентгеноструктурный фазовый анализ (РСФА) проводился на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance в излучении $K\alpha$ Co (фильтрация с помощью энергодисперсионного детектора Sol-X) в диапазоне углов отражения (2θ) $30 \dots 140^\circ$ при напряжении $U = 40$ кВ, токе трубки $I = 40$ мА с использованием щелей Соллера падающего пучка; измерительный диаметр составлял 500 мкм, шаг $0,02^\circ$, время набора импульсов на каждом шаге – от 3 до 5 с. Качественный фазовый анализ осуществлялся в программном пакете DiffracPlus® EVA методом подбора эталонов из базы данных рентгенодифракционных спектров ICDD PDF2.

Исследование тонких фольг проводилось на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) Jeol «JEM-2100».

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Макроструктура сплава после ЭЛС не имеет существенных отличий. Микропоры присутствуют при всех режимах ЭЛС.

Микроструктуры для каждого из режимов аналогичны друг другу. На границах зёрен наблюдаются выделения δ -фазы. Также для каждого режима в структуре присутствуют неметаллические включения в виде черных участков (рисунок 1). Отличия заключаются в среднем размере аустенитного зерна, а также в среднем расстоянии между выделениями δ -фазы (таблица 3).



а – режим №1; б – режим №2; в – режим №3; г – режим №4;
 1 – интерметаллид; 2 – неметаллические включения; 3 – δ-фаза; 4 –
 возможно карбид; 5 – матрица

Рисунок 1 – Микроструктура сплава Inconel 718

Таблица 3. Составляющие микроструктуры после ЭЛС

Режим	1	2	3	4
Размер зерна, мкм	20...25	10...13	6...10	8...12
Расстояние между выделениями δ-фазы, мкм	18...21	14...17	9...13	11...15

На рисунке 2 представлена рентгенофазовая диаграмма сплава Inconel 718 (режим 4). Так, из рисунка 2 видно, что наиболее интенсивными являются рефлексы γ -Ni, а самыми слабыми – δ-фаза. Следовательно, в исследуемом образце Inconel 718 содержится значительно больше содержания γ -фазы, чем δ-фазы и γ'' -фазы.

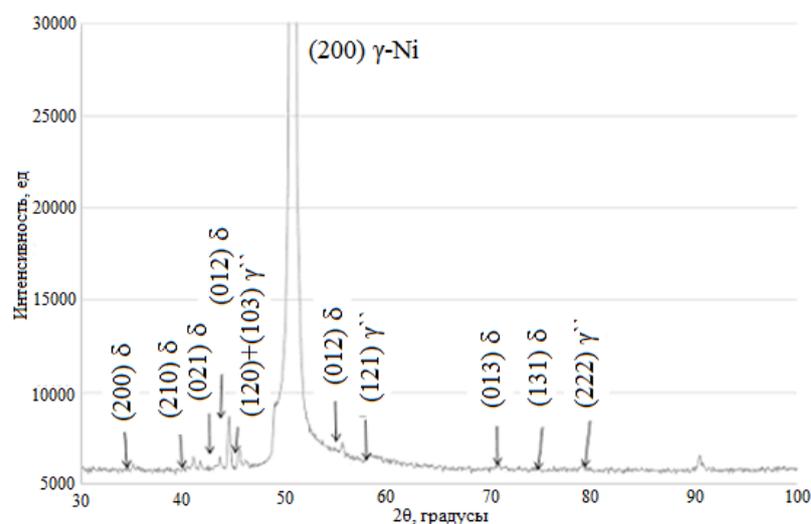
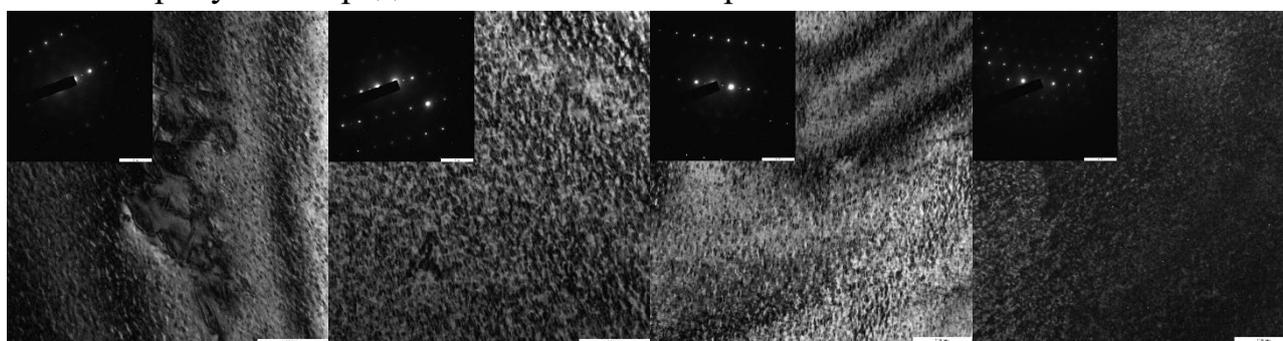


Рисунок 2 – Рентгенофазовая диаграмма сплава Inconel 718, режим 4

На рисунке 3 представлены ПЭМ-изображения сплава Inconel 718



а – режим №1; б – режим №2; в – режим №3; г – режим №4;

Рисунок 3 – ПЭМ-изображения в светлом фоне, показывающие микроструктуры сплава Inconel 718, полученного по разным режимам ЭЛС, с соответствующими картинками дифракции γ'/γ'' фаз и γ -матрицы

Предположительно, разница в твердости (таблица 4) кроется в тонкой структуре и разной доле упрочняющей γ' -фазы.

Таблица 4. Зависимость твердости сплава Inconel 718 от режимов ЭЛС

Режим	Твердость, HV	
	Поперечное направление	Продольное направление
1	285	309
2	294	332
3	285	341
4	273	292

Твердость коррелирует с плотностью энергии воздействующей на материал. Чем она выше при одинаковом токе пучка, тем выше твердость. В этом случае плотность энергии контролируется скоростью сканирования, и чем она

меньше, тем выше плотность энергии и твердость. При повышении плотности энергии за счет увеличения тока пучка наблюдается противоположный эффект: твердость снижается с увеличением плотности энергии.

4. ВЫВОДЫ

1. Определено, что режим ЭЛС влияет на параметры структуры сплава Inconel 718. Чем выше скорость сканирования при остальных одинаковых параметрах режима ЭЛС, тем меньше размер зерна и меньше межчастичное расстояние между интерметаллидами.

2. Определен фазовый состав сплава Inconel 718 после разных режимов ЭЛС. Основная фаза γ -Ni, также присутствуют δ -фаза, γ' -фаза и γ'' -фаза.

3. Показано, что твердость сплава Inconel 718 коррелирует с плотностью энергии режима ЭЛС. При одинаковом токе пучка уменьшение скорости сканирования повышает плотность энергии, и твердость сплава увеличивается. При одинаковой скорости сканирования увеличение тока пучка повышает плотность энергии, и твердость сплава при этом уменьшается.

Библиографический список

1. X. Zhao Role of Superficial Defects and Machining Depth in Tensile Properties of Electron Beam Melting (EBM) Made Inconel 718 / X. Zhao, [и др.] / Materials Characterization. 2001. V. 60. I. 2. P. 397–405.

2. А. А. Педаш Структура и свойства образцов из сплава Inconel 718 полученных по технологии селективного лазерного плавления / А. А. Педаш, Н. А. Лысенко, В. В. Ключихин // Авиационно-космическая техника и технологии. 2017. № 5. С. 46-52.