

УДК 620.187.2: 620.178.152.341.4: 539.536

Анализ микроструктуры и микротвердости интерметаллидного материала системы Ni-Cr-Al, полученного методом электронно-лучевого аддитивного производстваМ.А. Лысунец¹, Е.А. Загибалова², Д.О. Астапов^{2,3}Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. Е.Г. Астафурова²¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055³Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050E-mail: mal27@tpu.ru**Analysis of the microstructure and microhardness of the intermetallic material Ni-Cr-Al obtained by the electron-beam additive manufacturing**M.A. Lysunets¹, E.A. Zagibalova², D.O. Astapov^{2,3}Scientific Supervisors: Ass. Prof., Dr. E.G. Astafurova²¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050²Institute of Strength Physics and Materials Science, Russia, Tomsk, Akademicheskyy pr. 2/4, 634055³Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050E-mail: mal27@tpu.ru

Abstract. *By applying the method of electron beam additive manufacturing, there were obtained samples of two intermetallic alloys of the Ni-Cr-Al system. In the course of the study, there were studied the features of their microstructure and microhardness. It has been established that the ratio of NiCr and Al components fed in the process of additive manufacturing of intermetallics determines the morphology of the structure of the resulting blanks and their microhardness.*

Key words: *electron beam additive manufacturing, intermetallic alloys, microstructure, microhardness, dendritic structure.*

Введение

Электронно-лучевое аддитивное производство (ЭЛАП) является одним из перспективных методов изготовления изделий с конфигурацией различного уровня сложности [1]. Оно имеет несколько преимуществ, например, полученная деталь требует минимальной механической обработки, что позволяет снизить количество отходов при ее производстве. Высокая скорость ЭЛАП-процесса позволяет быстро получить качественное изделие. Еще одно достоинство метода – возможность получения различных интерметаллидных соединений. Данные соединения сейчас особенно востребованы в аэрокосмической промышленности ввиду низкой плотности, высоких жаропрочности и твердости [2]. Цель работы – определить особенности микроструктуры и микротвердости интерметаллидных материалов, полученных методом электронно-лучевого аддитивного производства с использованием двух промышленных проволок NiCr и Al.

Материалы и методы исследования

Заготовки были получены методом ЭЛАП с использованием лабораторного оборудования и программного обеспечения, разработанного в ИФПМ СО РАН [3]. Во время ЭЛАП-процесса производилась одновременно подача двух проволок: NiCr ((73- 79)%Ni, (20-23)%Cr, (0,9-1,5)%Si, ≤1,5%Fe, ≤0,7%Mn, ≤0,3%Ti, ≤0,03%P, ≤0,02%S, ≤0,2%Al, ≤0,1%C, мас. %) и Al (≥99,5%Al, ≤0,4%Fe, ≤0,3%Si, ≤0,07%Zn, ≤0,05%Mn, ≤0,05%Ti, ≤0,05%Cu). Соотношение скоростей подачи проволок составляло NiCr:Al = 3:1 (далее – «3NiCr+Al») и 1:1

(«NiCr+Al»). Заготовки состояли из 40 слоев (0,5–0,7 мм каждый), в каждом слое было нанесено шесть дорожек материала, расположенных параллельно друг другу. Направление осаждения не изменялось. Параметры процесса были следующие: $P = 1 \times 10^{-3}$ Па, ускоряющее напряжение – 30 кВ, ток пучка – 43 мА («3NiCr +Al») и 28 мА («NiCr +Al»), частота сканирования – 100 Гц. Материал наносился на подложку из аустенитной нержавеющей стали (Fe, 18%Cr, 8%Ni, 0,1%C), ее не охлаждали. Во избежание влияния элементов, входящих в состав подложки, на основной материал, перед нанесением основного состава на подложке был выращен барьерный слой NiCr. Все микроструктурные характеристики и микротвердость измерялись в зоне двухпроводочной подачи. Для проведения исследований из центральной части заготовки вырезали пластину перпендикулярно направлению наплавки. Каждый из образцов был механически отшлифован и отполирован. Микроструктуру исследовали с помощью светового микроскопа Altami MET 1С и растрового электронного микроскопа LEO EVO 50 (РЭМ). Микротвердость измеряли методом Виккерса на микротвердомере AFFRI DM8 с нагрузкой на индентор 100 г.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены изображения поверхности образцов, полученных методом ЭЛАП. Оба образца, «NiCr+Al» (рис. 1 а, б) и «3NiCr +Al» (рис. 1 в, г), обладают дендритной микроструктурой, но морфология дендритов в исследуемых сплавах разная. Для образца «NiCr+Al» на рис.1 б можно отметить, что дендритные ветви более длинные и тонкие и объемная доля дендритной фазы выше, чем для образцов «3NiCr +Al» (рис. 1 г).

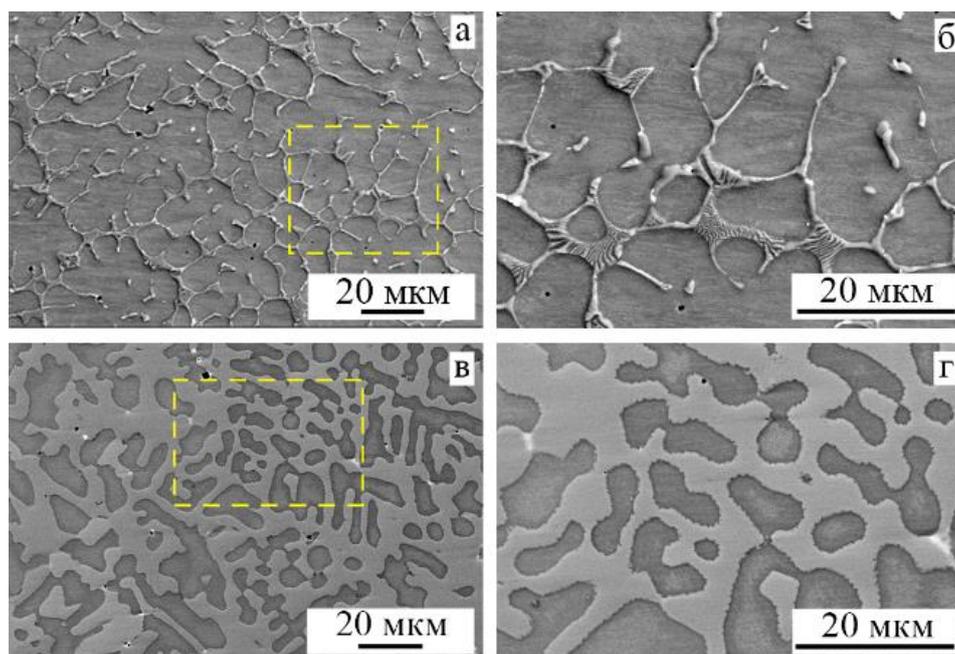


Рис.1. Микроструктура образцов «NiCr + Al» (а, б) и «3NiCr+Al» (в, г), полученные методом РЭМ

Междендритные прослойки в образцах «NiCr+Al» не всегда гомогенны, они имеют полосчатое строение. В сплаве «3NiCr +Al» они однородны, но межфазные границы «дендрит/междендрит» не гладкие, а «зубчатые». Согласно ранее проведенным исследованиям [4], образец «3NiCr+Al» – интерметаллический сплав, который имеет сложный состав на основе фаз Ni_3Al , Ni_3Cr и $NiAl$. Морфологические особенности структуры сплава «NiCr+Al» указывают на формирование структуры на основе γ -Ni и Ni_3Al фаз, но точный состав материала будет установлен при дальнейших исследованиях.

На рис. 2 представлены профили распределения микротвердости, измеренной вдоль направления выращивания заготовки. Значения микротвердости обоих образцов

незначительно возрастают по мере приближения к верхней части заготовки. Данное изменение может быть вызвано различной скоростью остывания разных частей заготовок в процессе изготовления, что могло привести к небольшому различию в соотношениях долей основных фаз в верхней и центральной частях обеих заготовок. Средняя микротвердость образца «NiCr+Al», составляющая 5,1 ГПа, выше микротвердости образца «3NiCr+Al» (4,3 ГПа). Можно заметить, что разброс значений микротвердости для сплава «3NiCr+Al» меньше, чем для сплава «NiCr+Al». Эти различия могут быть вызваны особенностями микроструктуры образцов и их фазовым составом.

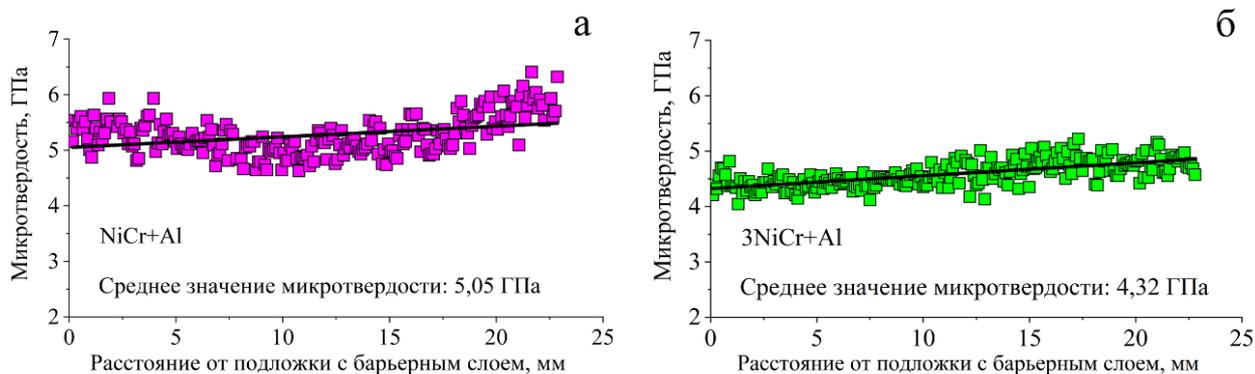


Рис. 2. Зависимости микротвердости образцов «NiCr+Al» (а) и «3NiCr+Al» от расстояния до подложки

Заключение

Таким образом, с помощью метода электронно-лучевого аддитивного производства были получены образцы двух интерметаллидных сплавов с разным соотношением компонент: «NiCr+Al» и «3NiCr+Al». Установлено, что оба сплава имеют дендритную структуру. Соотношение компонентов определяет морфологию структуры в получаемых заготовках, ее фазовый состав и микротвердость.

Исследование проведено в рамках проекта государственного задания FWRW-2022-0005. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН. Авторы выражают благодарность д.т.н. Е. А. Колубаеву, к.ф.-м.н. В. Е. Рубцову и к.ф.-м.н. С. Ю. Никонову.

Список литературы

1. Фролова А.Б., Шигапов А.И. История, текущее состояние и перспективы развития аддитивных технологий // Научные известия. – 2022. – № 29. – С. 198–202.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // Автоматическая сварка. – 2013. – № 10–11. – С. 23–32.
3. Osipovich K., Kalashnikov K., Chumaevskii A., Gurianov D., Kalashnikova T., Vorontsov A., Zyкова A., Utyaganova V., Panfilov A., Nikolaeva A., Dobrovolskii A., Rubtsov V., Kolubaev E. Wire-feed electron beam additive manufacturing: A Review // Metals. – 2023. – Vol. 13, № 2. – P. 279.
4. Astafurova E.G., Reunova K.A., Zagibalova E.A., Astapov D.O., Astafurov S.V., Kolubaev E.A. Microstructure, phase composition, and mechanical properties of intermetallic Ni-Al-Cr material produced by dual-wire electron-beam additive manufacturing // Metals. – 2024. – Vol. 14, № 1. – P. 75.