

АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ И МИКРОТВЕРДОСТИ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ Ni-Cr-Al, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

М.А. ЛЫСУНЕЦ^{1,2}, Е.А. ЗАГИБАЛОВА², Д.О. АСТАПОВ^{2,3}

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. Е.Г. Астафурова²

¹НИ Томский политехнический университет

²ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

³НИ Томский государственный университет

E-mail: mal27@tpu.ru

Интерметаллические соединения все чаще находят применение в современной промышленности. Обусловлено это их низкой плотностью, высокими жаропрочностью и твердостью [1]. Механические свойства изделий из интерметаллических соединений возрастают с повышением температуры их эксплуатации [2]. Это позволяет применять их в качестве материала для изготовления покрытий на изделиях для авиакосмической промышленности. К недостаткам интерметаллических соединений можно отнести высокую стоимость производства и низкую обрабатываемость поверхности полученных изделий. Одним из перспективных методов изготовления интерметаллических материалов является электронно-лучевое аддитивное производство (ЭЛАП). ЭЛАП-процесс позволяет не только получать интерметаллические соединения необходимого состава, но и избегать трудоемкого процесса последующей обработки.

Цель исследования – охарактеризовать микроструктуру, фазовый состав и микротвердость интерметаллических соединений системы Ni-Cr-Al, полученных методом электронно-лучевого аддитивного производства при одновременном осаждении проволок NiCr и Al и перспективных для создания интерметаллических покрытий различного состава.

Заготовки интерметаллических сплавов были получены методом двухпроволочного ЭЛАП с использованием лабораторного оборудования, разработанного в ИФПМ СО РАН [3]. Параметры процесса и химический состав проволок (промышленных проволок алюминия и сплава NiCr), используемых для ЭЛАП-процесса, детально описаны в работе [2]. Соотношение скоростей подачи проволок составляло NiCr:Al = 3:1 (далее – 3NiCr+Al) и 1:1 (NiCr+Al). Все заготовки состояли из 40 слоев (толщиной 0,5-0,7 мм), в каждом слое было нанесено шесть дорожек материала, расположенных параллельно друг другу. Материал наносился на подложку из аустенитной нержавеющей стали (Fe, 18 %Cr, 8 %Ni, 0,1 %C), которая в процессе выращивания заготовки не охлаждалась. Перед нанесением основного состава на подложке был выращен барьерный слой NiCr. Все исследования проводились в зоне двухпроволочной подачи.

Образцы для исследования вырезали из центральной части заготовки перпендикулярно направлению выращивания. Каждый из образцов был механически отшлифован и отполирован с помощью алмазных паст. Исследование фазового состава сплава проводилось на рентгеновском дифрактометре ДРОН 3 (Буревестник). Для интерпретации дифракционных картин использовались программное обеспечение PowderCell и база данных PDF. Микроструктуру исследовали с помощью светового микроскопа Altami MET 1С и растрового электронного микроскопа LEO EVO 50 (РЭМ), оснащенного приставкой для энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС-детектор). Микротвердость измеряли методом Виккерса на микротвердомере AFFRI DM8 с нагрузкой на индентор 100 г (10 с).

На рисунке 1 представлена микроструктура образцов, полученных методом ЭЛАП. Образцы NiCr+Al (рисунок 1 а, б) и 3NiCr +Al (рисунок 1 в, г) обладают схожей дендритной микроструктурой, но морфология дендритов отличается: образец NiCr+Al (рисунок 1 б) имеет более тонкие дендритные ветви. Объемная доля дендритной фазы составляет 87 %, что выше, чем у образцов 3NiCr+Al (63 %). Междендритные прослойки в образцах NiCr+Al не всегда

гомогенны по составу, в некоторых участках они имеют полосчатое строение. В сплаве 3NiCr+Al они однородны, но межфазные границы «дендрит/междендрит» не гладкие, а «зубчатые».

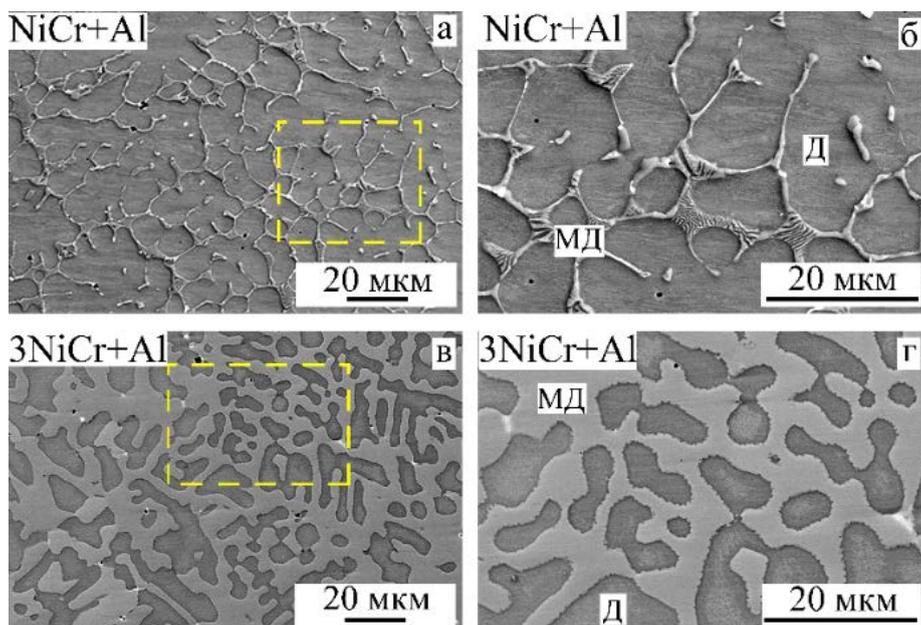


Рисунок 1. Микроструктура образцов NiCr+Al (а, б) и 3NiCr+Al (в, г), полученная методом РЭМ: Д – дендрит, МД – междендритная фаза

Согласно результатам ЭДС-анализа в образце NiCr+Al дендритная фаза преимущественно содержит Ni (54 %), а междендритная фаза – Cr (50 %). В образце 3NiCr+Al распределение элементов отличается. Наблюдается высокое содержание Ni как в дендритной, так и в междендритной фазах (до 62%). Преимущественное содержание Cr отмечается в междендритной фазе (26 %). Для сравнения, в дендрите образца 3NiCr+Al содержится до 9 % Cr. Более подробно результаты ЭДС-анализа приведены в работе [2].

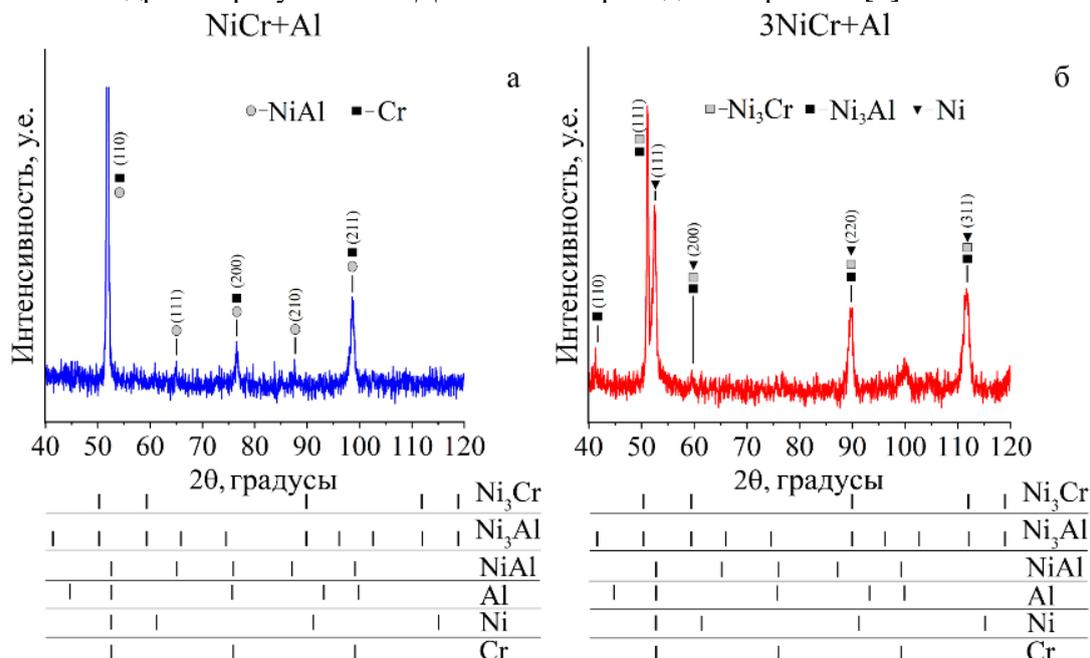


Рисунок 2. Рентгенограммы, полученные для соединений NiCr+Al (а) и 3NiCr+Al (б)

Полученные результаты ЭДС-анализа подтверждаются данными рентгеноструктурного анализа. Рентгенограмма, полученная для образца NiCr+Al, представлена на рисунке 2 (а). Все интенсивные

и слабые рефлексы, представленные на рентгенограмме, соответствуют фазе $B2-NiAl$. Значения угловых положений наиболее интенсивных рефлексов на рисунке 2 (а) также соответствуют Cr . Обе фазы имеют ОЦК кристаллическую решетку. То есть, рентгенограмма свидетельствует об образовании фаз $NiAl$ и Cr в структуре образца $NiCr+Al$. На рисунке 2 (б) представлена рентгенограмма, полученная для образцов $3NiCr+Al$. Принимая во внимание фазовую диаграмму системы $Ni-Al$ [4] и данные рентгеновского анализа структуру образца $3NiCr+Al$ можно интерпретировать как смесь фаз Ni_3Al+Ni и Ni_3Cr+Ni .

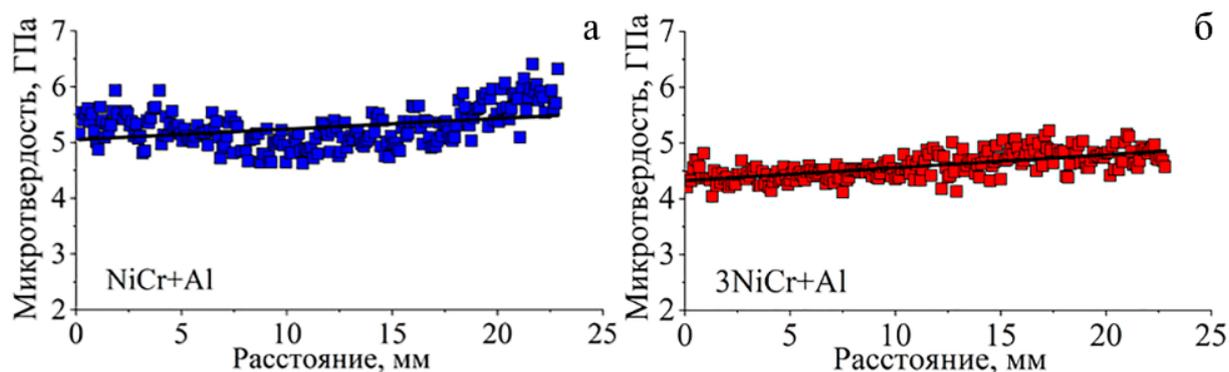


Рисунок 3. Зависимости микротвердости образцов $NiCr+Al$ (а) и $3NiCr+Al$ (б) от расстояния до подложки

На рисунке 3 представлены профили распределения микротвердости, измеренной вдоль направления выращивания заготовки. В верхней части образцов значение микротвердости незначительно выше, что может быть связано с различиями в термической истории слоев заготовок. Средняя микротвердость образца $NiCr+Al$ составляет 5,1 ГПа, что выше микротвердости образца $3NiCr+Al$ (4,3 ГПа).

Таким образом, с помощью метода электронно-лучевого аддитивного производства были получены образцы двух интерметаллических сплавов с разным соотношением компонент: $NiCr+Al$ и $3NiCr+Al$. Установлено, что оба сплава имеют дендритную микроструктуру. С помощью EDS-анализа и рентгеноструктурного анализа установлен фазовый состав образцов: смесь фаз $NiAl$ и Cr в образцах $NiCr+Al$ и Ni_3Al , Ni_3Cr и Ni в $3NiCr+Al$. Согласно результатам распределения микротвердости, значения микротвердости $NiCr+Al$ выше (5,1 ГПа), чем значение микротвердости в образцах $3NiCr+Al$ (4,3 ГПа). Разработанные материалы могут найти применение в качестве жаростойких и жаропрочных покрытий.

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

Список литературы

1. 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.
2. Astafurova E.G., Zagibalova E.A., Astapov D.O., и др., Microstructure and phase composition of Ni-Cr-Al-based intermetallics obtained by a dual-wire electron beam additive manufacturing // Russian Physics Journal. – 2024. – V. 67. – P. 1125–1132.
3. Osipovich K., Kalashnikov K., Chumaevskii A., et al., Wire-feed electron beam additive manufacturing: A Review // Metals. – 2023. – Vol. 13, №. 2 – P. 279. doi.org/10.3390/met13020279
4. Ковтунов А.И., Интерметаллидные сплавы: электронное учебное пособие / А.И. Ковтунов, С.В. Мямин. – Тольятти: изд-во ТГУ, 2018. – 1 оптический диск.