

УДК 620.187.2: 620.178.152.341.4: 539.536

**Микроструктура и микромеханизмы разрушения сплава 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: д.ф.-м.н. Е.Г. Астафурова²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

³Национальный исследовательский Томский государственный университет
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: mal27@tpu.ru

**Microstructure and fracture micromechanisms of Ni-Cr-Al alloy obtained
by electron-beam additive manufacturing**

M.A. Lysunets^{1,2}, E.A. Zagibalova², D.O. Astapov^{2,3}

Scientific Supervisor: Dr. E.G. Astafurova²

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

²Institute of Strength Physics and Materials Science, Russia, Tomsk, Akademicheskyy str., 2/4, 634055

³Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050

E-mail: mal27@tpu.ru

Abstract. *Using electron-beam additive manufacturing, a sample of Ni-Cr-Al alloy was obtained. Microstructure, microhardness and fracture micromechanisms of the alloy under uniaxial tension were studied. It was established that high fraction of the brittle intermetallic phases is responsible for low plasticity and brittle fracture of the material at temperatures below 873 K. The material and method can be applied for synthesis of intermetallic coatings.*

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

Введение

В современном машиностроении электронно-лучевое аддитивное производство (ЭЛАП) является одним из наиболее перспективных методов нанесения покрытий и изготовления деталей различной конфигурации [1]. Полученное с помощью ЭЛАП изделие требует минимальной механической обработки, что позволяет увеличить скорость и снизить количество отходов производства. Еще одно преимущество данного метода – получение соединений различного химического состава. В частности, сплавы системы Ni-Cr-Al особенно востребованы в аэрокосмической промышленности ввиду низкой плотности, высокой жаропрочности и твердости [2]. Цель работы – проанализировать микроструктуру и механизмы разрушения материала, изготовленного методом электронно-лучевого аддитивного производства с использованием двух промышленных проволок NiCr и Al, перспективного для получения жаропрочных и жаростойких покрытий систем Ni-Cr-Al.

Экспериментальная часть

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 (образец 3NiCr+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 подробно описаны в работе [3]. Материал наносился на неохлаждаемую подложку из аустенитной нержавеющей стали (Fe, 18%Cr, 8%Ni, 0,1%C). Во избежание влияния элементов подложки на заготовку, перед нанесением основного материала был «выращен» барьерный слой NiCr. Все микроструктурные характеристики и микротвердость измерялись в зоне двухпроволочной подачи. Микроструктуру и микромеханизмы разрушения образцов исследовали с помощью светового микроскопа Altamі MET 1С и растрового электронного микроскопа LEO EVO 50 (РЭМ). Микротвердость измеряли методом Виккерса на микротвердомере AFFRI DM8 с нагрузкой на индентор 100 г. Механические испытания проводились на электромеханической машине LFM-125 в интервале температур 24–900 °С с начальной скоростью деформации $5 \times 10^{-4} \text{с}^{-1}$. При каждой температуре проводилось испытание не менее 5 образцов.

Результаты

Полученный методом ЭЛАП образец обладает дендритной микроструктурой, объемная доля дендритной фазы составляет 63 %, а междендритной – 37 %. Согласно результатам рентгенофазового и EDS анализов, образец 3NiCr+Al – сплав на основе фаз Ni_3Al , Ni_3Cr , NiAl и $\gamma\text{-Ni}$ [3]. Микроструктура сплава подробно описана в работе [3]. Среднее значение микротвердости образца составляет 4,3 ГПа.

На рис. 1 представлены РЭМ-изображения боковых граней и поверхностей разрушения образцов 3NiCr + Al после одноосного растяжения, которое происходило при различных температурах: 24 °С (комнатная температура), 600 °С и 900 °С.

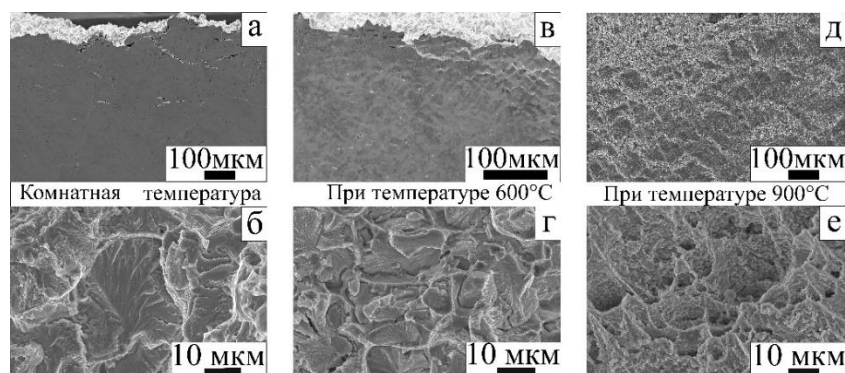


Рис. 1. РЭМ-изображения образцов 3NiCr+Al, разрушенных при разных температурах: (а), (в), (д) – боковые поверхности; (б), (г), (е) – поверхности разрушения. Температура испытания указана на изображениях

При комнатной температуре (рис. 2, а, б) образец разрушается макроскопически хрупко после незначительной пластической деформации, изменение площади поперечного сечения образца не происходит, шейка не образуется. На микроуровне образец разрушается по смешанному типу: на боковых поверхностях и поверхностях излома наблюдаются хрупкие транс- и интеркристаллитные трещины, а по границам транскристаллитных фасеток наблюдаются элементы вязкого излома. Поверхности транскристаллитных сколов занимает 34 % всей поверхности излома, а площадь индивидуальных фасеток изменяется от 16 мкм^2 до 650 мкм^2 . На поверхности излома образуется множество вторичных интеркристаллитных трещин, морфология их поверхности аналогична наблюдаемой на хрупких сколах. Анализ характера разрушения образцов позволяет предположить, что образование сколов вызвано разрушением фаз Ni_3Al , Ni_3Cr и NiAl , а образование элементов вязкого излома обусловлено «дорывом» участков с пластичной фазой на основе никеля.

Разрушение образца при растяжении в интервале $T \leq 600 \text{ °C}$ (рис. 2, в, г) аналогично разрушению образца при комнатной температуре, однако при 600 °С транскристаллитные

хрупкие фасетки занимают уже 53 % поверхности разрушения. Их площадь меньше, чем при комнатной температуре: изменяется от 5 мкм² до 195 мкм². На боковой поверхности можно отчетливо видеть следы пластической деформации.

При температурах выше 600 °С образец разрушается вязко с образованием ямочного излома (рис. 2, д, е). На боковой поверхности образца видны следы значительной пластической деформации и формирования «шейки» перед разрушением. Площадь поперечного сечения уменьшилась на 51 %. На поверхности излома выявляются частицы сферической формы.

Таким образом, проведенное исследование показало, что при повышении температуры характер разрушения образца изменяется. Формирование фаз Ni₃Al, Ni₃Cr и NiAl ответственно за хрупкое разрушение материала вплоть до температуры 600 °С.

Для оценки экономической выгоды метода ЭЛАП были рассчитаны прямые затраты на получение 1 м² интерметаллического покрытия системы Ni-Cr-Al [4]. Линейные размеры заготовки составляют 30×30×40 мм. Стоимость проволок: NiCr (X20H80, d = 1,2 мм) – 2 100 руб./кг; Al (АМГ6Н d = 1,2 мм) – 280 руб./кг. Для заготовки потребуется 0,225 кг проволоки NiCr и 0,025 кг – Al. Печать заготовки занимает около 3 часов. Мощность установки 15 кВт. Стоимость электроэнергии (при тарифе 3,44 руб./кВт×ч) для изготовления образца – 154,8 руб. Оплата работы инженера за день составит (с учетом налогов) – 975 руб. Затраты на изготовление заготовки составят 1 609,3 руб. Примем, что толщина интерметаллического покрытия составляет 0,5 мм [5]. В таком случае стоимость покрытия составит 22 351,39 руб. за 1 м². В результате чего можно утверждать, что покрытие, полученное методом ЭЛАП, является экономически выгодным.

Заключение

С помощью метода электронно-лучевого аддитивного производства был получен образец сплава системы Ni-Cr-Al с соотношением компонент 3NiCr+Al. Исследованы механизмы разрушения сплава при одноосном растяжении образца в интервале температур от комнатной до 900 °С. Установлено, что формирование фаз Ni₃Al, Ni₃Cr и NiAl ответственно за хрупкое разрушение материала вплоть до температуры 600 °С.

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 за помощь в подготовке материалов.

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. Astafurova E.G., Zagibalova E.A., Astapov D.O., Lysunets M.A., Astafurov S.V., Kolubaev E.A., 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.
4. Сыщиков Д.Н. Оптимизация технологических процессов изготовления лопаток турбины ГТД по количеству деталей в партии, запускаемой в производство, и заданной трудоёмкости их изготовления: дис. ... канд. техн. наук: защищена 2017: утв. 2017. – Рыбинск, 2017. – 147 с.
5. Пячин С.А. и др. Формирование интерметаллидных покрытий механическим легированием // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование. – 2019. – С. 137–140.