

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 620.172.2

DOI: 10.17223/00213411/69/2/12

**Температурная зависимость механизма разрушения сплава Ni–Al–Cr, полученного методом двухпроволочного электронно-лучевого аддитивного производства\***Д. Астапов<sup>1</sup>, Е.Г. Астафурова<sup>1</sup>, Е.А. Загибалова<sup>1</sup>,  
С.В. Астафуров<sup>1</sup>, Л.В. Данилова<sup>1</sup>, Е.А. Колубаев<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

Изучена температурная зависимость механизма разрушения сплава Ni–Al–Cr, полученного методом электронно-лучевого аддитивного производства, после испытаний на растяжение в интервале температур 300–1273 К. При  $T = 300$  К сплав представляет собой смесь фаз на основе NiAl ( $B2+L1_0$ ), Ni<sub>3</sub>Al и Ni, легированных Cr. Установлено, что с увеличением температуры испытания макро- и микромеханизм разрушения сплава изменяется при переходе через  $T_{\text{хв}} = 873$  К: от смешанного, интер- и транскристаллитного хрупкого и транскристаллитного вязкого, при  $T \leq T_{\text{хв}}$  до вязкого транскристаллитного при  $T > T_{\text{хв}}$ . Показано, что температура  $T_{\text{хв}}$  соответствует температуре обратного  $L1_0$  (NiAl)  $\rightarrow$  B2 (NiAl)-мартенситного превращения при нагреве. То есть формирование мартенситной  $L1_0$  (NiAl)-фазы в процессе аддитивного производства интерметаллического сплава Ni–Al–Cr выступает одним из факторов, ответственных за его хрупкое разрушение при комнатной температуре. Исследуемый сплав разработан для производства интерметаллических покрытий методом электронно-лучевого аддитивного производства.

**Ключевые слова:** электронно-лучевое аддитивное производство, интерметаллиды, разрушение.

Аддитивное производство (или 3D-печать) используется для получения заготовок сложной формы из интерметаллических сплавов, поскольку последние плохо обрабатываются резанием и точением [1–3]. Ранее была продемонстрирована принципиальная возможность получения заготовок сплава системы Ni–Al–Cr, которая широко применяется в авиакосмической отрасли [4], методом электронно-лучевого аддитивного производства (ЭЛАП) с использованием промышленных проволок NiCr и Al [5]. При комнатной температуре сплав обладал дендритной микроструктурой: дендриты представляют собой смесь фаз NiAl и Ni<sub>3</sub>Cr(Al), а междендриты – это смесь Ni + Ni<sub>3</sub>Al. Присутствие упорядоченных интерметаллических фаз в составе материала определяет его механическое поведение в интервале температур  $T = 300$ –1273 К [5]. Формирование в междендритных областях смеси  $\gamma + \gamma'$  (Ni + Ni<sub>3</sub>Al)-фаз обеспечивает типичную [6] для таких сплавов аномальную температурную зависимость прочностных свойств (с достижением максимума при  $T = 873$  К [5]). Однако влияние температуры на механизмы разрушения такого гетерофазного аддитивно изготовленного сплава системы Ni–Al–Cr до сих пор не установлено, что и является целью данной работы.

Заготовки интерметаллического сплава с линейными размерами 30×30×40 мм получены методом двухпроволочного аддитивного производства на лабораторной установке, разработанной в ИФПМ СО РАН (Томск, Россия) [7]. Проволоки NiCr (сплав X20NH80) и Al (сварочная проволока ESAB OK Autrod 1070) подавались одновременно в ванну расплава с соотношением скоростей подачи 3:1. Детали аддитивного производства сплава описаны в работе [5]. С помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ, LEO EVO 50, «Zeiss») была проведена аттестация поверхностей разрушения образцов (в форме двойных лопаток, размеры рабочей части 12×2.6×1.4 мм) после испытаний на растяжение в интервале температур  $T = 300$ –1273 К. Рентгеноструктурный анализ (РСА) проводился на дифрактометре ДРОН-8Н («Буревестник»), оснащенный высокотемпературной вакуумной камерой (CuK $\alpha$ -излучение), в интервале углов  $2\theta = 40$ –55° при температурах  $T = 300$ –1273 К с шагом 200 К. Качественный фазовый анализ полученных рентгенограмм выполняли с использованием программного обеспечения PowderCell с базой данных Powder Diffraction File.

Результаты анализа образцов после испытаний на одноосное растяжение показали, что в области температур  $T \leq 873$  К сплав системы Ni–Al–Cr характеризуется смешанным разрушением. Макроскопически образцы разрушаются хрупко после незначительной пластической деформации (удлинение составляет 2–10% [5]), признаков образования шейки не обнаружено. На поверхностях разрушения видны следы как хрупкого транскристаллитного разрушения по типу «скола», так и вязкого (ямочного) внутризеренного разрушения. Кроме этого, происходит формирование хрупких вторичных трещин (рис. 1, а, б).

На вставках рис. 1, а, б видны области с морфологией «скола», которые соответствуют разрушению дендритных областей, содержащих хрупкую фазу NiAl. Этот микромеханизм разрушения преобладает при

\* Исследования выполнены в рамках проекта государственного задания FWRW-2022-0005.