

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ НИКЕЛЯ И АЛЮМИНИЯ, ПОДАВАЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА, НА СТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОЛУЧАЕМЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Астафуров С.В., Астафурова Е.Г., Мельников Е.В., Нифонтов А.С., Колубаев Е.А.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

E-mail: elena.g.astafurova@ispms.ru

Перспективным с точки зрения промышленного применения является сплав Ni_3Al , который характеризуется высокой прочностью в широком интервале температур, положительной температурной зависимостью предела текучести в интервале температур от 0 до 800-900 °С, высокой коррозионной стойкостью, высокой стойкостью к усталостному разрушению, ползучести и износу. Благодаря своим уникальным свойствам сплавы на основе никеля и алюминия широко применяются в различных отраслях для высокотемпературных приложений. В частности, они используются при производстве лопаток газотурбинных двигателей, роторов турбокомпрессорных дизельных силовых установок, элементов конструкций в автомобильной, космической, металлургической и металлообрабатывающей отраслей промышленности. Недостатком сплавов на основе Ni и Al являются низкая пластичность и склонность к хрупкому разрушению, что существенно затрудняет их обработку при производстве изделий. Поэтому традиционные методы порошковой металлургии не позволяют получить конечных изделий на основе интерметаллических сплавов никеля и алюминия. Поэтому перспективным методом производства деталей машин и механизмов на основе алюминидов никеля является аддитивное производство, заключающееся в формировании изделия заданной формы из порошкового сырья или проволоки путем последовательного послойного нанесения материала и его плавления высокоэнергетическим пучком.

Настоящая работа посвящена исследованию структуры и фазового состава интерметаллических сплавов на основе никеля и алюминия, полученных методом электронно-лучевого аддитивного производства (ЭЛАП) с использованием алюминиевой и никелевой проволок. Для этого с использованием разработанной в ИФПМ СО РАН лабораторной ЭЛАП установки были получены заготовки сплавов на основе Ni и Al. Для формирования заготовок использовалась двухпроволочная подача в ванну расплава двух проволок диаметром 1,2 мм: никеля (сплав НП-2, 99,5 масс.% Ni) и алюминия (сплав ESAB OK Autrod 1070, 99,8 масс.% Al). Заготовки получали путем последовательного нанесения слоев одинаковой толщины на подложку из стали 09Г2С. Для получения интерметаллических сплавов с разным объемным содержанием компонентов (никеля и алюминия) варьировали соотношение скоростей подачи проволок Ni:Al. В результате были получены заготовки со следующим отношением никеля и алюминия: 1:1 (Ni+Al), 2:1 (2Ni+Al) и 3:1 (3Ni+Al).

Микроструктура сплавов на основе никеля и алюминия, полученных методом ЭЛАП

На рис. 1 представлены ОМ и СЭМ изображения микроструктуры полученных с использованием ЭЛАП технологии интерметаллических сплавов на основе никеля и алюминия. Металлографический анализ показал, что полученные заготовки не содержат макроскопических и микроскопических пор или трещин. Все три сплава характеризуются крупнокристаллической слоистой структурой. Внутри зерен выявляется дендритная микроструктура различной морфологии. Также наблюдаются участки (слои), для которых характерен однородный контраст на изображениях и в которых не выявлялись ликвации (рис. 1).

Сплав Ni+Al имеет достаточно однородную структуру с редкими прослойками. На макроскопическом уровне структура сплава Ni+Al более однородна, чем в сплавах 2Ni+Al и 3Ni+Al, с точки зрения формирования слоистой структуры. При этом и морфология внутризеренной микроструктуры в эквивалентном сплаве слабо изменяется по высоте заготовки (рис. 1 а, б). Наблюдаются чаще всего равноосные зерна с размером в диапазоне 100-300 мкм (рис. 1 а, б). Сплавы 2Ni+Al и 3Ni+Al характеризуются более неоднородной структурой с достаточно толстыми прослойками (толщиной до 200 мкм) и зернами вытянутой в направлении роста заготовки формой (рис. 1 в-е). Размер зерна в сплавах 2Ni+Al и 3Ni+Al составляет 150-400 мкм. Необходимо отметить, что в сплавах с большим содержанием никеля дендриты более узкие, их ветви часто не разорваны, то есть плотность границ дендрит/междендрит в этом материале существенно больше, чем в сплаве Ni+Al.

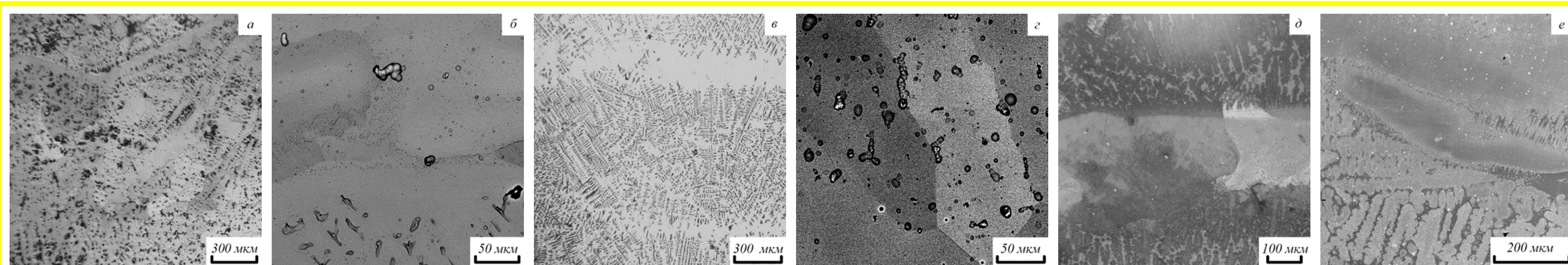


Рис. 1. ОМ (а, в, д) и СЭМ (б, г, е) изображения микроструктуры интерметаллических сплавов Ni+Al (а, б), 2Ni+Al (в, д) и 3Ni+Al (г, е)

Фазовый состав сплавов на основе никеля и алюминия, полученных методом ЭЛАП

Результаты рентгеновского фазового и микрорентгеноспектрального анализа показали, что фазовый состав получаемых методом ЭЛАП заготовок определяется соотношением скоростей подачи никелевой и алюминиевой проволок в ванну расплава, или, другими словами, массовым соотношением компонентов формируемого интерметаллического сплава. На рис. 2 и 3 представлены рентгенограммы и СЭМ изображения с обозначенными областями ЭДС спектров для полученных заготовок соответственно. Табл. 1 содержит данные о химическом составе и соответствующей ему фазе в различных областях исследованных образцов (в соответствии с рис. 3), полученных на основе ЭДС анализа для трех заготовок с разным соотношением компонентов: никеля и алюминия. Фаза в табл. 1 определялась на основе сопоставления химического состава в области снятия ЭДС спектра с диаграммой состояний «никель-алюминий».

Из рис. 2 а видно, что в случае соотношения скоростей подачи двух проволок Ni:Al=1:1 получаемая заготовка обладает гетерофазной структурой и состоит из фаз NiAl, Ni_5Al_3 и Ni_3Al . При этом согласно данным рентгенофазового исследования интерметаллическая фаза Ni_3Al не является основной, а по результатам ЭДС анализа данная фаза не выявляется вовсе (рис. 3а, табл.1). Следовательно, в процессе ЭЛАП при подаче в ванну расплава двух проволок (никелевой и алюминиевой) с одинаковой скоростью, то есть при близком массовом соотношении Ni и Al, формируемый интерметаллический сплав представлен преимущественно фазами NiAl и Ni_5Al_3 .

При увеличении соотношения скоростей подачи проволок в ЭЛАП процессе до Ni:Al=2:1 формируется интерметаллический сплав с более сложным фазовым составом. Согласно рентгенофазовому исследованию (рис. 2 б), формируемая заготовка обладает гетерофазной структурой и состоит из таких соединений как NiAl, Ni_5Al_3 , Ni_3Al и Ni. При этом согласно данным ЭДС анализа основной фазой в этом случае является Ni_3Al , а содержание трех других фаз относительно невелико (рис. 2 б, табл. 1).

Дальнейшее увеличение соотношения скоростей подачи проволок до Ni:Al=3:1 приводит к формированию двухфазного сплава на основе Ni и Ni_3Al (рис. 2 в, рис. 3 в, табл. 1). При этом формируемый интерметаллид Ni_3Al имеет параметр решетки $a = 0,3572$ нм. Это значение ниже характерной для γ' -фазы величины $a = 0,3589$ нм (для сверхструктуры $L1_2$ [23]). Такие различия могут быть вызваны формированием двухфазного состава ($\gamma + \gamma'$) в зернах Ni_3Al в процессе ЭЛАП, то есть образованием областей разупорядоченного γ' -твердого раствора на основе Ni_3Al совместно с упорядоченной γ -фазой. Параметр решетки Ni в формируемом сплаве, напротив, выше, чем в случае чистого ГЦК никеля ($a = 0,3568$ нм против $a = 0,3526$ нм [25]). Это может быть связано с формированием твердого раствора алюминия в никеле (по механизму замещения).

Результаты рентгенофазового и энергодисперсионного анализа полученных с помощью ЭЛАП интерметаллических сплавов показали, что их фазовый состав в целом соответствует массовому соотношению исходным материалов (проволок никеля и алюминия), подаваемых в ванну расплава при аддитивном производстве. Так в случае Ni:Al=1:1 основной фазой является NiAl, при Ni:Al=2:1 формируется значительная доля фазы Ni_3Al , а избыточный алюминий перераспределяется при формировании зерен Ni_5Al_3 . В случае трехкратного превышения содержания никеля над алюминием основной фазой является Ni_3Al . При этом рентгенофазовый и ЭДС анализ не выявили присутствия в полученных сплавах алюминия, что говорит о том, что он полностью участвует в формировании интерметаллических соединений в ЭЛАП процессе.

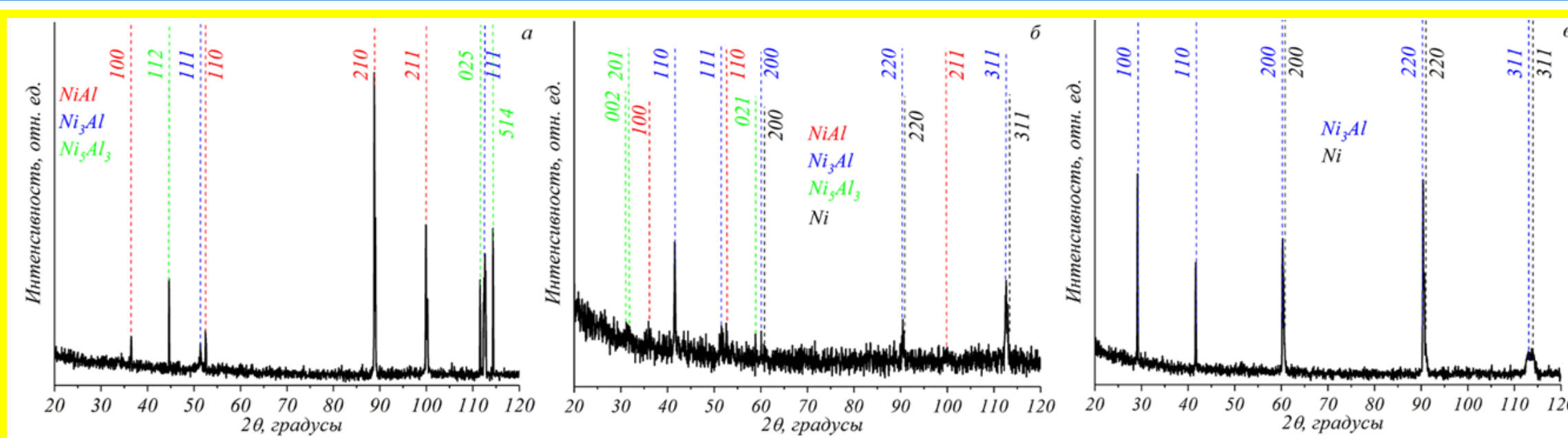


Рис. 2. Рентгенограммы интерметаллических сплавов Ni+Al (а), 2Ni+Al (б) и 3Ni+Al (в)

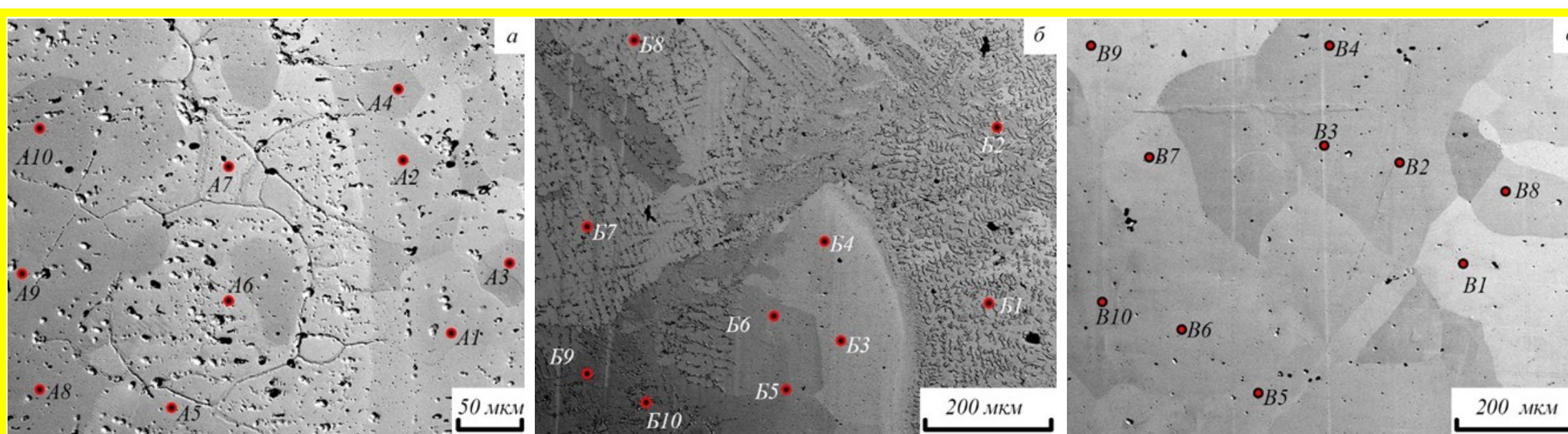


Рис. 3. СЭМ изображения микроструктуры интерметаллических сплавов, с нанесенными областями определения ЭДС спектров (Табл. 1): Ni+Al (а), 2Ni+Al (б) и 3Ni+Al (в)

Табл. 1. Химический и фазовый состав интерметаллических сплавов в областях проведения ЭДС анализа, обозначенных на рис. 3

№ спектра	Ni:Al=1:1		Фаза	Ni:Al=2:1		№ спектра	Ni:Al=3:1	
	Al/Ni ат. %	Фаза		Al/Ni ат. %	Фаза		Al/Ni ат. %	Фаза
A1	42,5/57,5	NiAl	B1	40,6/59,4	NiAl	B1	18,2/81,8	Ni_3Al +Ni
A2	41,8/58,2	NiAl	B2	30,6/69,4	Ni_5Al_3 + Ni_3Al	B2	16,1/83,9	Ni_3Al +Ni
A3	42,8/57,2	NiAl	B3	25,9/74,1	Ni_3Al	B3	15,4/84,6	Ni_3Al +Ni
A4	40,7/59,3	NiAl	B4	26,3/73,7	Ni_3Al	B4	15,1/84,9	Ni_3Al +Ni
A5	35/65	Ni_5Al_3	B5	35,2/64,8	Ni_5Al_3	B5	14,9/85,1	Ni_3Al +Ni
A6	36,1/63,9	Ni_5Al_3	B6	22,7/77,3	Ni_3Al +Ni	B6	14,5/85,5	Ni_3Al +Ni
A7	36,2/63,8	Ni_5Al_3	B7	27,4/72,6	Ni_3Al	B7	15,1/84,9	Ni_3Al +Ni
A8	36,3/63,7	Ni_5Al_3	B8	26,9/73,1	Ni_3Al	B8	18,8/81,2	Ni_3Al +Ni
A9	37,6/62,4	NiAl	B9	26,6/73,4	Ni_3Al	B9	13,5/86,5	Ni_3Al +Ni
A10	37,1/62,9	NiAl	B10	46/54	NiAl	B10	15,3/84,7	Ni_3Al +Ni

Таким образом, результаты исследования показали, что с использованием ЭЛАП процесса возможно формировать интерметаллические сплавы на основе никеля и алюминия с заданным фазовым составом за счет варьирования массового соотношения компонентов сплава, подаваемых в ванну расплава.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2022-0005.