

УДК 669.715:536.425

А.В. Паничкин<sup>1</sup>, Р.К. Аубакирова<sup>1</sup>, И.М. Алпысбай<sup>2\*</sup>,  
В.Р. Жумаканова<sup>2</sup><sup>1</sup>АО «Центр наук о земле, металлургии и обогащения», Казахстан, г. Алматы,<sup>2</sup>ДТО «Институт космических исследований имени У.М.Султангазина», Казахстан, г. Алматы

\*E-mail: metal\_iki@rambler.ru

### Структурно-фазовые превращения при контактном плавлении пары алюминий-никель

**Аннотация.** Исследовалось термодиффузионное взаимодействие твердого никеля и жидкого алюминия при различных режимах обработки. Впервые установлено, что существующая в широком интервале концентраций интерметаллидная фаза NiAl формируется в диффузионной зоне в виде двух слоев NiAl(1) и NiAl(2), которые по составу соответствуют крайним областям этого соединения по диаграмме состояния, что указывает на разрыв растворимости в системе.

**Ключевые слова:** термодиффузионное взаимодействие, диффузионные зоны, энергодисперсионный анализ.

#### Введение

Сплавы на основе системы Ni-Al относятся к материалам с высокими эксплуатационными характеристиками и имеют ряд преимуществ по сравнению с другими Ni-суперсплавами: высокую температуру плавления, достаточный модуль упругости, высокую теплопроводность, жаропрочность, низкую плотность и высокую коррозионную стойкость и износоустойчивость при повышенных температурах. Весьма ценным является их способность сохранять при высоких температурах хорошую термостойкость, что имеет большое значение в условиях работы с преобладанием факторов, обуславливающих накопление усталости. Они способны выдерживать нагрузки космических полетов (высокие температура и давление, вибрационные нагрузки на этапе выведения, низкие температуры космического пространства, глубокий вакуум, радиационное воздействие, микрочастицы и т.д.). Поэтому их применяют в первую очередь при создании перспективных образцов авиакосмической техники, в том числе летательных аппаратов с гиперзвуковыми скоростями, в двигательных установках. Изделия и элементы конструкций техники, имеющие в своем составе интерметаллические соединения с разными физическими

свойствами, широко используются. Среди них детали с поверхностным упрочнением, сварные соединения, биметаллические ферромагнитные изделия, слоистые конструкции и многие другие.

Ряд вопросов развития диффузионных процессов при контактах типа «твердое-твердое» «твердое-жидкое», являющихся фундаментальными факторами формирования слоистых структур при контактном плавлении, еще мало изучены. Это касается диффузионных зон, образующихся на границе двух металлов при отжиге, состав которых может содержать структуры, не отмеченные на известных фазовых диаграммах. Появление таких неизвестных фаз будет влиять на конечные свойства образующихся многослойных структур, в число которых входят жаростойкость, адгезия и устойчивость к химически агрессивным средам.

Принцип метода состоит в том, что диффузионную пару двух элементов, выдерживают при соответствующей температуре в течение времени, достаточном для того, чтобы произошло значительное перераспределение элементов при взаимной диффузии. Эффективность метода диффузионных пар для исследования металлических систем показали многочисленные эксперименты [1-3]. Наряду с данными о составе

фаз и протяженности областей их гомогенности, создание диффузионных слоев позволяет одновременно определить диффузионные характеристики фаз, скорость их роста и коэффициент взаимной диффузии, с которым, связан ряд физико-химических характеристик фаз.

В диффузионной зоне между металлами и сплавами образуются, как правило, все промежуточные фазы в той же последовательности, в какой они существуют на диаграмме состояния при данной температуре. Возникает возможность построения фазовых полей диаграмм состояния путем изучения изменения концентрации компонентов в диффузионном слое. Скачки в изменении состава соответствуют границам однофазных областей на диаграммах состояния, соприкасающиеся фазы в диффузионном слое являются фазами, находящимися в равновесии друг с другом [4]. Распределение элементов по сечению диффузионной зоны изучают с помощью электронно-зондового микроанализа. Изменения фазового состава проявляются на концентрационной кривой в виде ступенек, края которых соответствуют равновесным составам фаз. Согласно [5] в системе Al-Ni образуется 5

соединений: NiAl<sub>3</sub> (β-фаза), Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> (γ-фаза), NiAl (δ-фаза), Ni<sub>3</sub>Al (ε-фаза), недавно открыта [6] фаза Ni<sub>5</sub>Al<sub>3</sub> (рис. 1).

Эксперименты методом термодиффузии пары твердый Ni – жидкий Al нами проводились при температурах от 900 до 1700°C и времени выдержки от 5 до 420 минут в алундовом тигле. После охлаждения образцов делали их шлифы. Сформировавшуюся диффузионную зону изучали при помощи оптической и растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и методом измерения микротвердости по трем линиям отпечатков, выставляемым перпендикулярно поверхности раздела при минимально возможной нагрузке на индентор. Состав фаз и распределение элементов по сечению диффузионной зоны определяли при помощи энергодисперсионного анализа. Для этого перпендикулярно к поверхности раздела проводили линейное сканирование для получения линий характеристического излучения Ni и Al и делали точечный анализ за 2-4 мкм от поверхности раздела формирующихся фаз, а в случае малой (<5 мкм) ширины фазы состав определяли по центру слоя.

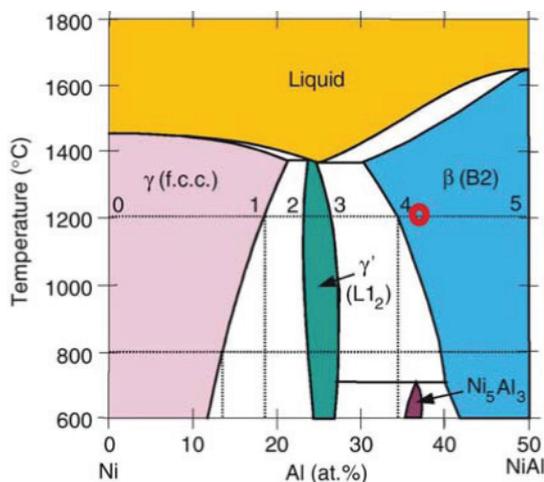


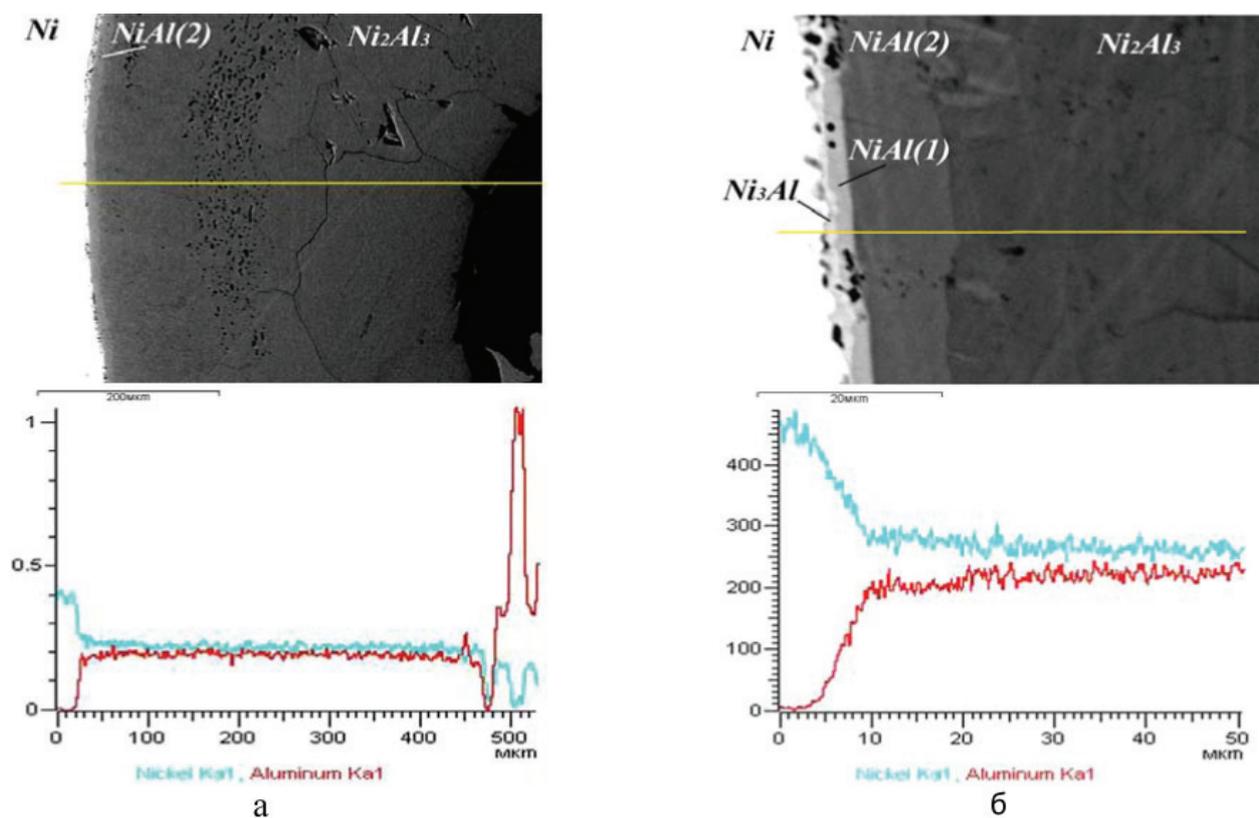
Рисунок 1 – Никелевый угол диаграммы состояния Al-Ni

В процессе исследования закономерностей изменения структуры, фазового состава и свойств диффузионной зоны определены условия наиболее интенсивного роста каждой из фаз, существующих в системе Al-Ni. Впервые установлено, что существующая в широком интервале концентраций интерметаллидная фаза

NiAl, формируется в диффузионной зоне в виде двух слоев NiAl(1) и NiAl(2), которые по составу соответствуют крайним областям этого соединения по диаграмме состояния. В интервале температур 950-1150°C эти фазы разделены четкой поверхностью раздела при переходе через которую концентрация изменяется на величину

>10at%. Согласно кривым характеристического излучения, вблизи границы раздела этих фаз концентрация меняется незначительно, что не типично для непрерывного ряда твердых растворов. В связи с этим есть все основания предполагать разрыв растворимости в соединении NiAl и существование в этой области двух фаз.

На рисунке 2 показано, что в диффузионной зоне, сформированной при 950°C в течение 7 часов, образуются две фазы NiAl(1) и NiAl(2) в виде четко выраженных слоев и показано формирование обширной пористости в фазах Ni<sub>3</sub>Al и NiAl(1), которая прослеживалась и при более высоких температурах обработки.



Увеличение: а-х200, б-х2000.

**Рисунок 2** – Распределение элементов и структура диффузионной зоны, формирующейся в результате контакта Ni и Al при 950°

Исследование структуры диффузионной зоны, сформированной между никелем и алюминием при 1200°C в течение 90 минут показало, что в ней наиболее интенсивно формируется фаза NiAl(2), находящаяся в контакте с расплавом.

Фазы Ni<sub>3</sub>Al и NiAl(1) образовались в виде более узких слоев. Анализ состава вблизи границы раздела фаз NiAl(1) и NiAl(2) показал наличие скачка концентрации величиной 10,6 ат.%. Ре-

зультаты анализа фаз, формирующихся в диффузионной зоне при различных режимах обработки, сведены в таблице 1.

Разрыв растворимости в фазе NiAl отличается наличием четко очерченных областей, незначительно сужающихся с повышением температуры. Таким образом, можно заключить, что наши выводы о существовании в этой области двух фаз верны.

**Таблица 1** – Интервал концентраций фаз (ат.%Ni), образующихся в диффузионной зоне в результате изотермического контакта Al и Ni при различных температурах

Параметры изотермической выдержки	Ni <sub>3</sub> Al	NiAl (1)	NiAl (2)	Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>	NiAl <sub>3</sub>
700°C, 7 часов	-	-	-	37,34-40,73	23,78-24,16
800°C, 7 часов	-	-	-	37,86-42,36	23,5-24,71
950°C, 7 часов	76,47	62,45	44,28-47,94	42,88-47,94	-
1000°C, 2 часа	74,47	62,03	44,98	38,7-41,51	-
1050°C, 3 часа	73,01	58,04-62,22	43,05-46,38	39,32-42,12	-
1100°C, 1 час	75,72	59,42-63,22	43,26-46,63	38,53-42,11	-
1150°C, 2 часа	74,43	59,83-63,88	43,9-46,89	-	-
1200°C, 1,5 часа	74,99	58,14 -65,63	47,41-42,18	-	-

Состав фазы NiAl(2) близок к эквиполному, но несколько смещен в сторону алюминия (42-47ат.%Ni, а при низких температурах 44-47ат.%Ni), поэтому стехиометрическое соотношение элементов в нем должно быть верно. Фаза NiAl(1) формируется в интервале концентраций 58-65,5ат.%Ni, а при низких температурах ее состав близок к 62ат.%Ni. Такое соотношение элементов соответствует соединению Ni<sub>5</sub>Al<sub>3</sub>. Между тем, как следует из последнего варианта диаграммы состояния этой системы, данное соединение действительно образуется и существует при температурах ниже 750°C [4].

### Литература

- 1 М. Paulasto, F. J. J. Van Loo, J.K. Kivilahti Thermodynamic and experimental study of Ti-Ag-Cu alloys // J. Alloys and Compounds. – 1995. – Vol. 220, № 1-2. – P. 136-141.
- 2 Y. Minamino, T. Yamane, T. Miyake, M. Koizumi, Y. Miyamoto Effect of high pressure on diffusion reaction and phase diagram in Al-Mg system // Rept. Res. Group Metallograph. Study Aluminum High Pressure, Nov., – 1994. – Osaka, 1994. – P. 77-83.
- 3 Угасте Ю.Э. Взаимная диффузия в интерметаллических фазах с узкой областью гомогенности / Ю.Э. Угасте, К.В. Пукк // Металлофизика и новые технологии. – 1996. – Т.18. – №3. – С. 35-38.
- 4 Бокштейн, Б.С. Диффузия в металлах. -М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
- 5 Хансен, М. Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко – М.: Металлургиздат, 1962. Т. 1, Т. 2 – 1488 с.
- 6 Campbell, C.E. Comparison of experimental and simulated multicomponent Ni-base super-alloy diffusion couples /C.E. Campbell, J-C Zhao, M.F. Henry //J. Phase Equili. Diff.- 2004. – №25. – P. 6-15.

А.В. Паничкин, Р.К. Аубакирова, И.М. Алпысбай, В.Р. Жумаканова

**Алюминий – никель жұбының, түйіскен балқыту кезіндегі, құрылым-фазалық түрленулері**

Қатты никель мен сұйық алюминийдің жылу диффузиялық өзара әрекеттесуінің әртүрлі тәртіптерінде өңдеуі зерттелді. NiAl интерметаллид фазасының, концентрациясы кең интервалда шоғырланған, диффузиялық аймақта екі: NiAl(1) және NiAl(2), қабаты түрінде қалыптасқандығы ең алғаш рет анықталды. Бұл қосылудың күй диаграммасы бойынша, шеткі облыстарға сәйкес келуі, жүйедегі ерігіштіктің үзілгендігін көрсетеді.

**Түйін сөздер:** жылулық диффузиялық әсерлесу, диффузиялық аймақтар, дисперсиялық талдау.

A.V. Panichkin, R.K. Aubakirova, I.M. Alpysbay, V.R. Zhumakanova

**Structurally-phase transformations at contact fusion of pair aluminium-nickel**

Thermodiffusion interaction of firm nickel and liquid aluminium was investigated at various modes of processing. For first time it is established that NiAl intermetallic phase existing in the wide concentration range is formed in the diffusion zone in the form of two layers of NiAl(1) and NiAl(2) which correspond to the composition of the extreme regions of the compound on the phase diagram which indicates the gap in solubility in the system.

**Keywords:** interaction of thermal diffusion, diffusion zone, Energy-analysis.