

УДК 620.186.5: 669.017

Формирование диффузионной зоны на границе раздела биметалла никель/алюминий*С.В. Макаров, М.Г. Олимов, В.А. Плотников, С.В. Хлебутина, О.С. Яковлева*

Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Formation of a Diffusion Zone at the Interface of Nickel/Aluminum Bimetal*S.V. Makarov, M.G. Olimov, V.A. Plotnikov, S.V. Hlebutina, O.S. Yakovleva*

Altai State University (Barnaul, Russia)

Проведены исследования формирования диффузионной зоны на границе раздела никель/алюминий. Биметаллические образцы, представляющие собой спрессованные пластины никеля и алюминия, отжигались в вакуумной печи при температуре выше температуры плавления алюминия. Закономерности формирования диффузионной зоны исследовали на образцах с разными временными интервалами отжига. Спеченные образцы разрезали поперек границы раздела, поверхность среза шлифовали и полировали.

Анализ экспериментальных результатов свидетельствует, что увеличение времени термической активации диффузионных процессов приводит к возрастанию ширины диффузионной зоны, для которой измеренная микротвердость представляет собой функцию с максимумом, что свидетельствует о характере распределения фазовых составляющих на границе раздела никель/алюминий. Наиболее широкую область гомогенности, как следует из диаграммы состояния Ni-Al, а, следовательно, и большую вероятность образования интерметаллических соединений имеют фазы NiAl и Ni₃Al. Диффузионная зона представляет собой макроскопический объект на границе раздела биметалла никель/алюминий, тем самым свидетельствует о макроскопическом диффузионном пути диффузантов.

Измеренные диффузионные параметры диффузионной зоны на границе раздела биметаллического образца свидетельствуют о том, что по мере увеличения времени выдержки при 700 °C растет коэффициент диффузии. Увеличение коэффициента диффузии, очевидно, связано с формированием разветвленных межкристаллитных и межфазных границ в ходе синтеза в диффузионной зоне интерметаллических соединений. Совокупность интерметаллических фаз и твердых растворов определяет прочностные свойства диффузионной зоны, следовательно, и адгезионную прочность биметаллического агрегата.

In this paper, a study of a diffusion zone at the nickel/aluminum interface is carried out. Bimetallic samples constructed from pressed plates of Nickel and Aluminum have been annealed in a vacuum furnace at a temperature above the melting temperature of aluminum. Formation patterns of diffusion zones are investigated using the samples with different intervals of annealing time. Sintered samples have been cut across the boundaries of the section; the cut surface has been polished.

Analysis of experimental results shows that the increase of diffusion process thermal activation time leads to the increase diffusion zone width. For this zone, the measured microhardness is a function with its maximum that indicates the nature of the phase components distribution at the Nickel/Aluminum interface. According to the Ni-Al phase diagram, the widest homogeneity range and, consequently, greater probability of formation of intermetallic compounds, have NiAl and Ni₃Al phases. The diffusion zone itself is a macroscopic object at the interface of Nickel/Aluminum bimetal, thereby, showing the macroscopic diffusion of diffusants.

Measured diffusion parameters of the diffusion zone at the interface of bimetallic sample demonstrate the increase of diffusion coefficient with the increase of exposure time at 700 °C. Apparently, this behavior is due to the formation of branched intergranular and interphase boundaries during the synthesis of intermetallic compounds in the diffusion zone. The combination of intermetallic phases and solid solutions determines the strength properties of the diffusion zone, and, consequently, the adhesion strength of the bimetallic compound.

Ключевые слова: никель, алюминий, диффузионная зона, взаимная диффузия, аномальная диффузия, интерметаллическая фаза, защитные и упрочняющие покрытия.

DOI 10.14258/izvasu(2018)1-04

Введение

В области контакта двух разнородных металлов происходит процесс взаимной диффузии, результатом которого является формирование переходной области, так называемой диффузионной зоны [1]. Диффузионная зона характеризуется градиентом концентрации и градиентом химического потенциала в связи с неоднородным распределением компонентов системы, вследствие чего происходит диффузионное перемещение атомов, ведущее в итоге к установлению во всем объеме образца фазового состава, определяемого диаграммой состояния. Процессы взаимной диффузии, протекающие в диффузионной зоне, лежат в основе многих технологических процессов, например таких, как нанесение защитных и упрочняющих покрытий на поверхности металлов, что и определяет актуальность данного исследования.

В многокомпонентных системах взаимная диффузия в диффузионной зоне сопровождается как формированием неограниченных твердых растворов на основе компонент, участвующих во взаимной диффузии образца, так и возникновением интерметаллических фаз. Поэтому коэффициент взаимной диффузии будет существенно зависеть от структурно-фазового состояния диффузионной зоны. Внутренние границы раздела (границы зерен и межфазные границы) являются каналами ускоренной диффузии. Диффузия по границам протекает на несколько порядков быстрее, чем в объеме кристалла [2].

В системе Ni–Al, являющейся базовой для получения ряда жаропрочных сплавов, интерметаллические соединения обладают высокой температурой плавления, высокой теплопроводностью, высокой коррозионной стойкостью [3]. Все это и определяет повышенный интерес к данной системе. В этой связи целью работы является исследование формирования диффузионной зоны за счет взаимной диффузии элементов на границе раздела биметаллических образцов Ni/Al.

Материалы и методика исследования

Пластины никеля и алюминия, приведенные в плотное соприкосновение путем прессования, подвергались изотермическому отжигу в вакуумной печи при остаточном давлении 10^{-4} мм рт. ст. и температуре 700 °С. Время выдержки при этой температуре было выбрано: для первого образца — 2 часа, для второго —

Key words: nickel, aluminum, diffusion zone, mutual diffusion, anomalous diffusion, intermetallic phase, protective and strengthening of the coating.

5 часов, для третьего — 8 часов. Следовательно, в работе рассматривается взаимная диффузия при контакте типа «твердое — жидкое» (Ni — «твердое», Al — «жидкое»). После охлаждения образцы разрезали перпендикулярно границе раздела, изготавливали шлифы путем механического очищения поверхности и полирования. Металлографические исследования диффузионной зоны проводили на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-32. Измерение микротвердости осуществляли на приборе ПМТ-3М с нагрузкой 100 г на индентор.

Формирование фаз в системе никель — алюминий

Согласно диаграмме состояния Ni–Al [3] (см. рис. 1) при взаимодействии алюминия с никелем могут синтезироваться интерметаллические фазы NiAl₃, Ni₂Al₃, NiAl, Ni₃Al. Кроме того, способны образовываться твердые растворы переменного состава, существующие в ограниченном интервале концентраций. Среди приведенных интерметаллических соединений лишь фаза NiAl и в меньшей степени фаза Ni₃Al имеют широкую концентрационную область гомогенности [4]. Это может свидетельствовать о некотором преимущественном зарождении таких фаз при активации диффузионных процессов на границе раздела биметаллических образцов никель — алюминий.

Результаты эксперимента

При термической активации взаимной диффузии в биметаллическом образце никель/алюминий (выдержка при 700 °С в течение двух часов) наблюдается, как показано на рисунке 1, формирование диффузионной зоны, в которой распределение фазовых составляющих в окрестности границы раздела представляет собой функцию с максимумом.

Как следует из данных рисунка 1, диффузионная зона представляет собой область концентрации двухфазной смеси шириной около 150 мкм, а максимум микротвердости величиной около 7 ГПа соответствует прочности фазы NiAl₃ [5] или Ni₂Al₃ [6].

Увеличение времени выдержки биметаллического образца при 700 °С значительно расширяет диффузионную зону. Как показано на рисунке 2, выдержка при 700 °С в течение 8 часов сопровождается увеличением ширины диффузионной зоны примерно до 300 мкм.

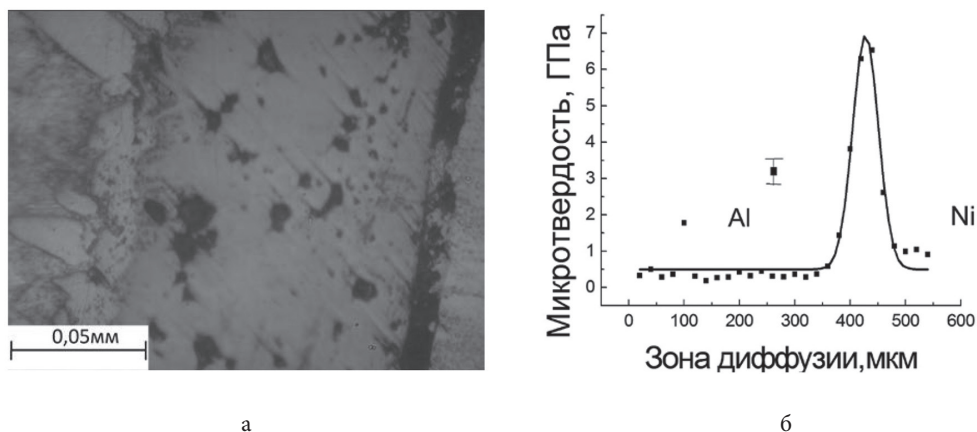


Рис. 1. Структура диффузионной зоны на границе раздела никель/алюминий при выдержке в течение двух часов при 700 °С (алюминий слева) (а). Распределение микротвердости в окрестности границы (б)

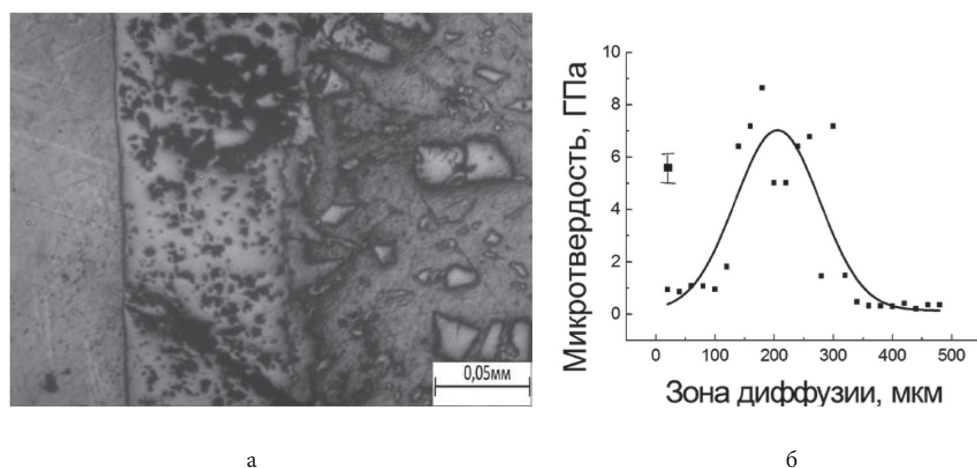


Рис. 2. Структура диффузионной зоны на границе раздела никель/алюминий при выдержке 8 часов при 700 °С (алюминий слева) (а). Распределение микротвердости в окрестности границы (б)

Диффузионная зона представляет собой структурно неоднородную область в окрестности границы между компонентами алюминий (слева) и никель (справа), что может свидетельствовать об активности направленных диффузионных потоков реагирующих компонент.

Геометрия диффузионной зоны. Для анализа геометрических параметров диффузионной зоны экспериментальные зависимости аппроксимировали функцией Гаусса

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{w^2}},$$

где w — полуширина диффузионной зоны; A — величина микротвердости; x — текущее значение ширины диффузионной зоны. Результаты анализа изменения микротвердости в диффузионной зоне, осуществленные с помощью функции Гаусса для пяти биметаллических образцов, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры функции Гаусса

Номер образца	Время отжига, час	y_0 , мкм	x_0 , мкм	w , мкм	A/w , ГПа/мкм	Chi2	R
1.1	2	0,5±0,2	368,0±3,1	47,2±6,6	354±54,6	0,66	0,87
1.2	2	0,5±0,1	427,7±1,3	46,9±2,8	379±24,2	0,14	0,96
2.1	5	0,2±0,7	299,4±6,6	87,2±15,6	986±209	3,63	0,91
2.2	5	0,4±0,7	275,5±2,6	78,5±6,1	903±83,2	0,14	0,97
3.1	8	0,1±0,7	205,8±9,3	143,1±26,3	1231±285,8	2,53	0,73

Анализируя данные таблицы 1, отметим следующие тенденции в развитии диффузионной зоны при увеличении времени выдержки при 700 °С: смещение максимума x_c в сторону алюминия; значительное увеличение полуширины диффузионной зоны; рост микротвердости в диффузионной зоне. Все это свидетельствует об активных диффузионных процессах, лежащих в основе формирования обширной диффузионной зоны и синтеза интерметаллических соединений.

Расчет коэффициента диффузии

Диффузионные процессы на границе раздела биметалла никель/алюминий протекают в условиях термической активации, а также действия градиен-

та концентрации и градиента химического потенциала. В этой связи рассчитать коэффициент диффузии D можно по формуле

$$D = \frac{x^2}{2t},$$

где x — средняя глубина диффузионного слоя (для расчета берется половина глубины диффузионного слоя); t — время диффузионного процесса [7].

Используя данную формулу, мы рассчитали коэффициенты взаимной диффузии для пяти образцов. В таблице 2 приведены значения коэффициента диффузии, свидетельствующие о росте коэффициента диффузии при увеличении времени выдержки при 700 °С.

Таблица 2

Коэффициенты взаимной диффузии на границе раздела никель/алюминий

Номер образца	Время отжига, час	Полуширина диффузионной зоны, мкм	Коэффициент диффузии, $10^{-8} \text{см}^2/\text{с}$
1.1	2	47,20	0,155
1.2	2	46,92	0,153
2.1	5	87,25	0,211
2.2	5	78,53	0,171
3.1	8	143,17	0,356

Обсуждение

Формирование диффузионной зоны на границе раздела биметалла никель/алюминий, термоактивируемое выдержкой при 700 °С, осуществляется в условиях аномальных диффузионных процессов. Коэффициент диффузии практически совпадает с коэффициентом самодиффузии по границам наклона для алюминия (при $T = 700\text{K}$, $D = 1,2 \cdot 10^{-12} \text{см}^2/\text{с}$), определен методом компьютерного моделирования с использованием парного потенциала Морзе [8]. Результатом таких процессов является синтез интерметаллических соединений системы Ni–Al в диффузионной зоне. Из сопоставления измерений микротвердости с литературными данными [6] можно заключить, что диффузионная зона представляет собой смесь интерметаллических фаз Ni_3Al , NiAl , Ni_2Al_3 , NiAl_3 , причем фазовый состав зависит от времени выдержки. Следует отметить, что диффузионная зона представляет собой, как и для системы титан/алюминий [9], макроскопический объект на границе раздела биметалла никель/алюминий, свидетельствуя тем самым о макроскопическом диффузионном пути диффузантов. Рост коэффициента диффузии при увеличении времени выдержки при 700 °С, очевидно, связан с формированием разветвленных межкристаллитных и межфазных границ в ходе синтеза интерметаллических соединений в диффузионной зоне.

Характерно, что диффузионная зона смещается в сторону алюминия, что может быть связано с высоким коэффициентом диффузии никеля в алюминии. Действительно, коэффициент диффузии Ni в жидком алюминии составляет $5 \cdot 10^{-4} \text{см}^2/\text{с}$ [6], что может обеспечивать миграцию диффузионной зоны относительно исходной границы раздела.

Заключение

Исследования трансформации границы раздела в биметаллических образцах алюминий/никель свидетельствуют об аномальных диффузионных процессах, протекающих в условиях термической активации диффузионной подвижности и действию градиента химического потенциала. Диффузионная зона представляет собой совокупность интерметаллических фаз системы Ni–Al, распределенных с переменной плотностью в макроскопической области — окрестности исходной границы раздела и смещенной в сторону алюминия. Рост коэффициента диффузии при увеличении времени выдержки при 700 °С обусловлен формированием дополнительных диффузионных каналов — межкристаллитных и межфазных границ. Совокупность интерметаллических фаз твердых растворов определяет прочностные свойства диффузионной зоны, следовательно, и адгезионную прочность биметаллического агрегата.

Библиографический список

1. Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. — М., 1979.
2. Каур И., Густ В. Диффузия по границам зерен и фаз. — М., 1991.
3. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. — М., 1996.
4. Федорищева М.В., Сергеев В.П., Сергеев О.В., Козлов Ф.В. Структура и механические свойства интерметаллидного магнетронного покрытия на основе системы Ni–Al // Известия РАН. Серия физическая. — 2009. — Т. 73, №7.
5. Терехов С.В. Взаимная диффузия в конденсированных растворах // Журнал технической физики (ЖТФ). — 2007. — Т. 7.
6. Иванько А.А. Твердость : справочник. — Киев, 1968.
7. Алюминиевые сплавы. Металловедение алюминия и его сплавов : справочное руководство. — М., 1971.
8. Драгунов А.С., Демьянов Б.Ф., Векман А.В. Моделирование процессов самодиффузии по границам зерен // Актуальные проблемы физики твердого тела : сборник докладов Международной научной конференции. — Минск, 2009. — Т. 3.
9. Алонцева Д.Л., Плотников В.А., Олимов М.Г., Макаров С.В. Формирование обширной диффузионной зоны на границе раздела титан — алюминий // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. — 2012. — № 4/2.