

ДИФфуЗИОННАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА γ -TiAl С ЖАРОПРОЧНЫМ НИКЕЛЕВЫМ СПЛАВОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОПРОСЛОЕК Al/Ni

Фальченко Ю.В., Петрушинец Л.В., Мельниченко Т.В., Устинов А.И., Федорчук В.Е.

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Изучено влияние структурных характеристик и химического состава нанослойных промежуточных прослоек на основе системы Al-Ni на формирование соединений сплава на основе γ -TiAl и жаропрочного никелевого сплава при диффузионной сварке в вакууме. Показано, что применение нанослойных плакированных промежуточных прослоек обеспечивает формирование диффузионной зоны с монотонным изменением содержания компонентов, фазовый состав и микромеханические характеристики которой определяются химическим составом промежуточной прослойки, а также снижает вероятность формирования хрупких фаз в стыке. Библиогр. 18, табл. 6, рис. 7.

Ключевые слова: диффузионная сварка в вакууме, интерметаллиды, нанослойные прослойки

Алюминиды титана являются перспективными материалами для изготовления деталей авиационных двигателей, обшивки и сотовых конструкций сверхзвуковых летательных аппаратов. Сплавы на основе γ -TiAl могут использоваться для получения деталей горячего тракта газотурбинных двигателей, работающих при 700...1000 °С [1]. Из литых алюминидов титана изготавливают уплотнители кожуха, воздушные фильтры, детали сопла, лопатки компрессора, элементы конструкции камеры сгорания, клапаны автомобильных двигателей и т. д. [2].

С развитием аэрокосмических технологий и разработкой новых конструкционных жаропрочных сплавов возникает необходимость соединения пар разнородных материалов, например, интерметаллидных сплавов γ -TiAl и жаропрочных сплавов на основе никеля. Сочетание разнородных жаропрочных материалов в конструкции расширяет возможности ее функционального применения.

Существующие технологии сварки плавлением данных материалов не позволяют получить высококачественные сварные соединения из-за ликвационных явлений, структурных и фазовых превращений в металле шва и зоне термического влияния, что приводит к появлению горячих трещин в соединении [3, 4]. Диффузионная сварка в вакууме (ДСВ) является наиболее перспективным методом соединения сплавов на основе γ -TiAl с жаропрочными сплавами на никелевой основе [5–7]. Однако при данном методе сварки образование соединения сопровождается формированием диффузионной зоны со сложным фазовым составом, включающим хрупкие фазы, которые могут негативно влиять на механические свойства соединения. С другой стороны, низкая пластичность γ -TiAl за-

трудняет установление физического контакта при ДСВ. Для активации свариваемых поверхностей при диффузионной сварке разнородных материалов и интенсификации диффузионных процессов обычно применяют промежуточные пластичные прослойки [8]. Однако применение промежуточных прослоек, полученных прокаткой и имеющих толщину 50...300 мкм, приводит к формированию диффузионной зоны с химическим составом и механическими свойствами, резко отличающимися от свойств свариваемых материалов [9]. При использовании такого подхода для интенсификации диффузионных процессов в зоне соединения применяют предварительное наводороживание промежуточных прослоек. Однако для предотвращения выделения водорода на стадии нагрева сварку проводят с применением высокоинтенсивных источников нагрева, способных обеспечить скорость повышения температуры до 1200 °С/мин [6].

Для активации диффузионных процессов при формировании соединения перспективно применение покрытий или промежуточных фольг с нано- и субмикроструктурной структурой, характеризующихся сверхпластичностью, что позволяет локализовать пластическую деформацию свариваемых поверхностей непосредственно в стыке. Так, авторы работы [6] проводили лазерную модификацию поверхности алюминида титана, что в сочетании с нанесением слоя TiAl на поверхность никелевого сплава обеспечило получение бездефектного соединения. Авторы работ [7, 10, 11] показали, что применение при ДСВ разнородных и трудно деформируемых материалов нанослойных прослоек в виде фольги или покрытия позволяет активировать свариваемые поверхности, повысить интенсивность диффузионных

процессов и снизить термомеханическое воздействие на свариваемые материалы. С этой точки зрения перспективным является применение промежуточной прослойки в виде нанослойной реакционной фольги, полученной методом электронно-лучевого осаждения, которые характеризуются интенсивным прохождением фазовых превращений и низкотемпературной пластической деформацией при термомеханическом нагружении [12, 13]. Выбор химического состава и структурных характеристик промежуточной прослойки определяется химическим составом свариваемых материалов и рабочей температурой эксплуатации изделия.

Целью настоящей работы является исследование особенностей формирования соединений сплава на основе γ -TiAl и никелевого жаропрочного сплава с содержанием хрома > 20 мас. % и с объемной долей γ' -фазы < 10 об. % способом ДСВ через нанослойные промежуточные прослойки.

Методика исследований. Химический состав сплава на основе γ -TiAl и жаропрочного никелевого сплава приведен в табл. 1.

Сплав на основе γ -TiAl получен методом электронно-лучевого переплава с последующим изостатическим прессованием под давлением 120...150 МПа при температуре 1260 °С на протяжении 4 ч, что обеспечивало залечивание дефектов литья. Полученный материал подвергался гомогенизирующему отжигу при 1100 °С продолжительностью 6...8 ч, прокатке с малой скоростью при температуре 1200 °С и гомогенизирующей термообработке при 1100 °С продолжительностью 6...8 ч. Полученный сплав на основе интерметаллида γ -TiAl характеризуется ламельной двухфазной структурой γ/α_2 .

Жаропрочный никелевый сплав с объемной долей γ' -фазы < 10 об. % относится к группе удовлетворительно свариваемых сплавов и характеризуется высокой жаропрочностью, низкой теплопроводностью, высокой склонностью к ме-

ханическому упрочнению (наклепу) в процессе механической обработки [14].

Подготовка образцов под сварку состояла в их порезке на электроэрозионном станке, шлифовке поверхностей и обезжиривании. Образцы сваривали встык на установке У-394М [15]. Диффузионную сварку интерметаллидного сплава γ -TiAl с жаропрочным никелевым сплавом проводили в вакууме $P_{\text{св}} = 1,33 \cdot 10^{-3}$ Па при температуре $T_{\text{св}} = 1050$ °С, давлении $P_{\text{св}} = 20$ МПа, времени сварки $t_{\text{св}} = 20$ мин.

Промежуточные прослойки на основе системы Al-Ni в виде нанослойной фольги с однородным распределением компонентов и плакированной слоями металлов (рис. 1, а, б) толщиной 20...35 мкм, периодом чередования слоев 60...200 нм получали методом послойного электронно-лучевого осаждения паровых фаз алюминия и никеля, подробно описанным в работе [16]. Структура и химический состав промежуточных прослоек представлен в табл. 2. При нагреве многослойной фольги в условиях одноосного растяжения она испытывает низкотемпературную интенсивную пластическую деформацию, подобную сверхпластической деформации, что обусловлено фазовыми и структурными превращениями, проходящими в ней при нагреве [13] (рис. 1, в, г).

Анализ микроструктуры сварных соединений и нанослойных фольг проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа CamScan-4, оснащенного системой энергодисперсионного анализа EDX INCA 200 для определения химического состава материала на плоских образцах. Образцы для исследования в виде шлифов поперечного сечения фольг и сварных соединений готовили по стандартной методике с использованием шлифовально-полировального оборудования фирмы Struers.

Оценку микротвердости и коэффициента пластичности сварных соединений проводили путем определения микромеханических характеристик на установке «Микрон-гамма» методом автоматическо-

Таблица 1. Химический состав сплавов

Сплав	Химический состав, мас. %							
	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb
Ni-сплав ЭИ437Б	0,92	0,46	2,65	21,01	0,25	0,83	73,88	–
Сплав γ -TiAl	32,65	–	59,24	3,9	–	–	–	4,21

Таблица 2. Характеристика промежуточной прослойки

Промежуточная прослойка	Химический состав реакционной прослойки Al/Ni, мас. %		Толщина реакционной и плакирующих прослоек, мкм		
	Al	Ni	Реакционная прослойка	Cu	Ni
Al/Ni (AlNi)	34,82	65,18	30	–	–
Al/Ni (AlNi ₃)	13,32	86,68	34	–	–
Ni-Al/Ni-Ni	32,56	67,44	17	–	3+3
Cu-Al/Ni-Ni	12,03	87,97	22	2	1

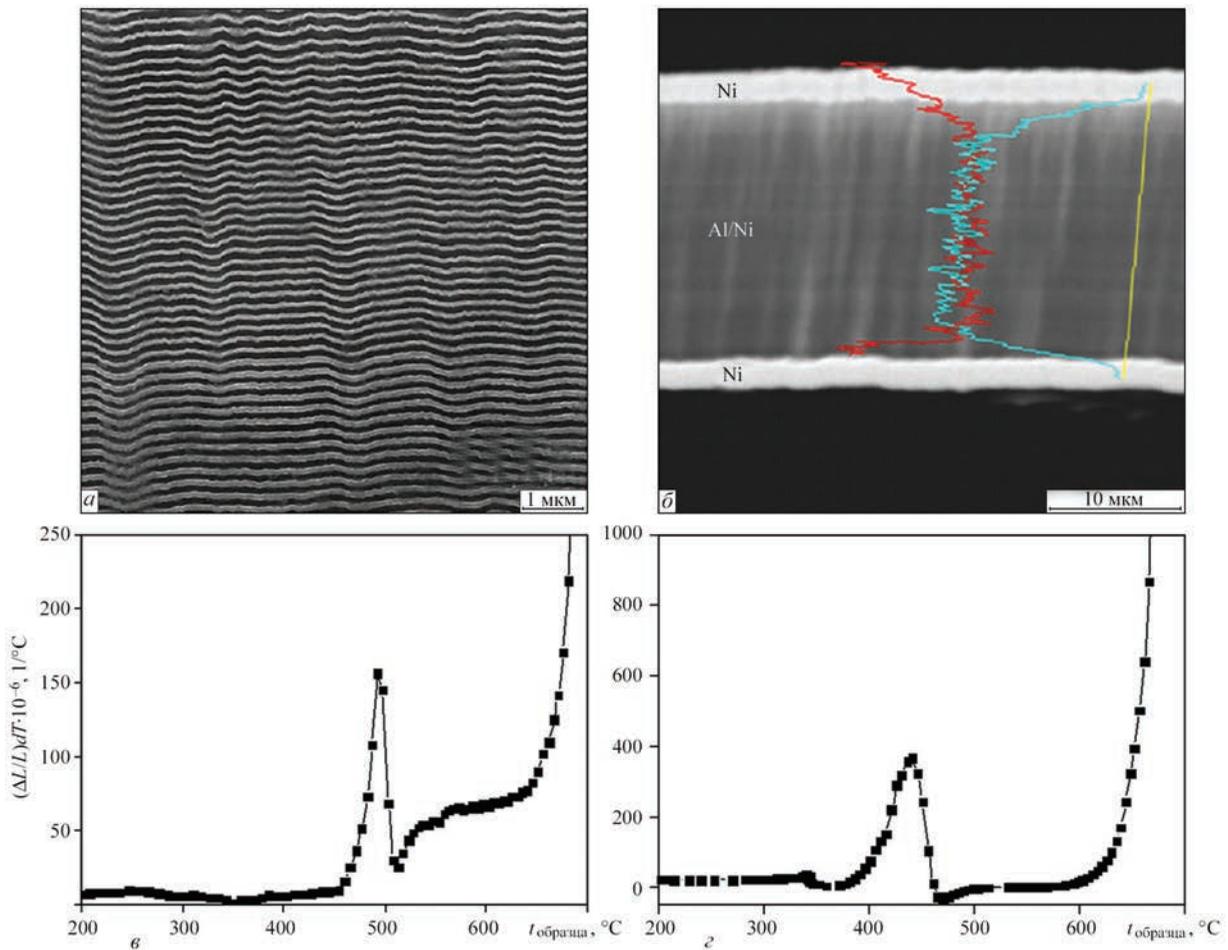


Рис. 1. Микроструктура и скорость деформации при нагреве в условиях одноосного растяжения нанослойной фольги с однородным распределением компонентов (а, в) и плакированной (б, г), соответственно

го индентирования с использованием алмазной пирамиды Берковича ($\alpha = 65^\circ$) при нагрузке 0,4 Н [17].

Результаты исследований.

Сварка интерметаллидного сплава γ -TiAl с жаропрочным никелевым сплавом. При ДСВ алюминид титана со сплавом ЭИ437Б без промежуточных прослоек в соединении формируется диффузионная зона толщиной приблизительно 35 мкм, состоящая из интерметаллидных слоев на основе системы Ti-Ni-Al разного состава (рис. 2, табл. 3), преимущественно состоящих из фаз

τ_3 -Al₃NiTi₂ и τ_4 -AlNi₂Ti [18]. Формирование интерметаллидных слоев приводит к повышению микротвердости диффузионной зоны до 14 ГПа.

Формирование интерметаллидов с механическими характеристиками, значительно отличающимися от свариваемых сплавов, обуславливает возникновение напряжений в соединении, что приводит к появлению трещин при охлаждении (рис. 2) в зонах, примыкающих к никелевому сплаву, в которых вследствие диффузии хрома формируется хрупкая фаза CrNi₂ (рис. 2, б).

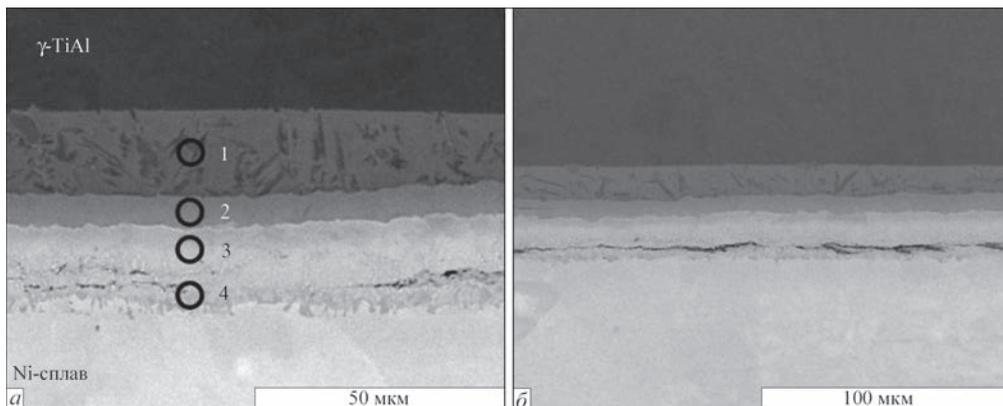


Рис. 2. Микроструктура соединения γ -TiAl–никелевый сплав, полученного диффузионной сваркой без промежуточной прослойки (1–4 — область анализа)

Таблица 3. Химический состав участков в зоне соединения, показанных на рис. 2, а

Область анализа	Химический состав зон анализа, мас. %						Фаза
	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	
1	22,92	65,48	4,3	–	3,78	3,52	–
2	24,45	39,41	4,4	0,48	28,15	3,11	τ_3
3	12,77	13,36	7,06	–	66,8	–	τ_4
4	7,7	5,83	35,66	–	50,82	–	–

Можно предположить, что пластичная промежуточная нанослойная прослойка будет не только обеспечивать физический контакт свариваемых поверхностей, но и влиять на характер диффузионных процессов в соединении и формирование фазового состава диффузионной зоны. Для оценки такого влияния изучена роль нанослойных промежуточных прослоек на основе системы Al-Ni химического состава, соответствующего стехиометрии интерметаллидов AlNi и AlNi₃, и плакированных прослоек на их основе: Ni-Al/Ni(AlNi)-Ni, Cu-Al/Ni(AlNi₃)-Ni, при формировании соединений γ -TiAl с жаропрочным никелевым сплавом.

Исследование влияния промежуточной прослойки Al/Ni на формирование соединения интерметаллидного сплава γ -TiAl и никелевого сплава.

1. Прослойка состава AlNi.

Использование в качестве промежуточной прослойки нанослойной фольги состава AlNi не обеспечивает формирование соединения (рис. 3), что, по-видимому, является следствием высокой реакционной способности фольги и формирования в соединении хрупкого интерметаллидного слоя на основе соединения AlNi, наличие которого способствует появлению трещин в стыке при охлаждении.

2. Прослойка состава AlNi₃.

Диффузионную сварку сплавов γ -TiAl и никелевого жаропрочного сплава проводили с использованием в качестве промежуточной прослойки нанослойной фольги системы Al-Ni, состав которой соответствует интерметаллиду AlNi₃. Как

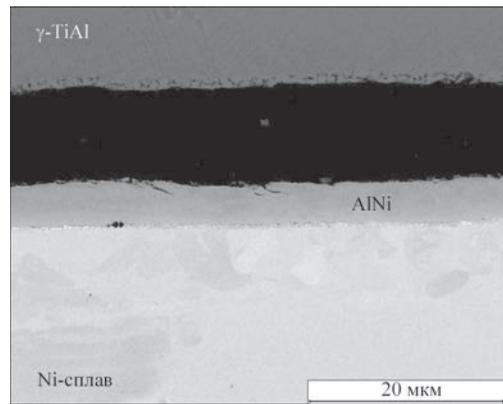


Рис. 3. Микроструктура соединения γ -TiAl — никелевый сплав, полученного с применением промежуточной нанослойной прослойки состава AlNi

видно из анализа микроструктуры соединения (рис. 4, а), использование такой промежуточной прослойки обеспечивает активацию взаимной диффузии компонентов фольги и сплавов с формированием бездефектного соединения. С учетом того, что реакционная способность нанослойной фольги состава AlNi₃ на порядок ниже [19], чем состава AlNi, можно предположить, что характер фазовых превращений при нагреве нанослойной прослойки влияет на диффузионные процессы в соединении. В результате взаимной диффузии компонентов формируется диффузионная зона шириной приблизительно 50 мкм с монотонным изменением концентрации компонентов в ней (рис. 4, б, табл. 4). В результате реакционной диффузии компонентов сплавов и промежуточной прослойки со стороны γ -TiAl в соединении формируется прослойка тройной интерметаллидной фазы τ_4 , что приводит к повышению микротвердости материала в области стыка (рис. 4, в).

Влияние плакированной промежуточной прослойки на основе системы Al-Ni на формирование соединения интерметаллидного сплава γ -TiAl и никелевого сплава.

1. Прослойка Ni-Al/Ni -Ni.

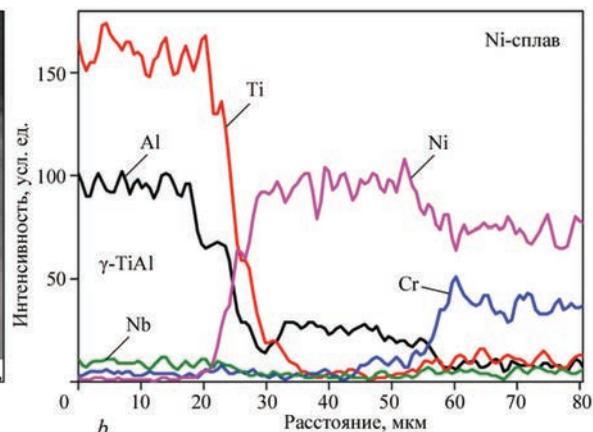
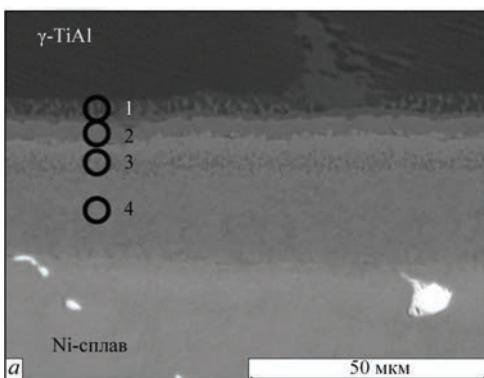


Рис. 4. Микроструктура (а) и распределение компонентов (б) в соединении γ -TiAl — никелевый сплав, полученного с применением промежуточной нанослойной прослойки состава AlNi₃

Таблица 4. Химический состав участков в зоне соединения, показанных на рис. 4, а

Область анализа	Химический состав зон соединения, мас. %					Фаза
	Al	Ti	Cr	Ni	Nb	
1	22,94	59,72	1,76	11,62	3,97	—
2	13,69	24,27	—	60,64	1,4	τ_4
3	12,25	5,59	—	82,16	—	—
4	12,83	0,31	1,35	85,51	—	—

Отсутствие соединения при использовании промежуточной прослойки Al/Ni состава, соответствующего стехиометрии AlNi, дало основание предположить, что наличие плакирующих прослоек никеля на поверхностях нанослойной фольги позволит улучшить физический контакт свариваемых поверхностей благодаря химическому сродству никелевых прослоек к γ -TiAl и никелевому сплаву [12].

Диффузионную сварку γ -TiAl и никелевого сплава проводили через плакированную промежуточную прослойку Ni-Al/Ni-Ni, которая состоит из нанослойной фольги системы Al-Ni состава, соответствующего стехиометрии AlNi, и плакирующих слоев никеля (табл. 2). Как показали металлографические исследования сварных соединений, поры и трещины в стыке отсутствуют (рис. 5).

Использование при сварке плакированной нанослойной фольги обеспечивает формирование соединения и способствует активному протеканию диффузионных процессов в промежуточной прослойке. Взаимная диффузия компонентов сплава и фольги приводит к формированию в стыке диффузионной зоны шириной 45 мкм с монотонным изменением концентрации компонентов (рис. 5, б) и слоистой структурой. Со стороны γ -TiAl формируются слои интерметаллидных фаз на основе Ti-Ni-Al с разным соотношением компонентов (табл. 5). Наличие слоев никеля на поверхности промежуточной фольги с одной стороны способствует снижению диффузии хрома из никелевого сплава, о чем свидетельствует низ-

Таблица 5. Химический состав участков в зоне соединения, показанных на рис. 5, а

Область анализа	Химический состав зон соединения, мас. %				
	Al	Ti	Cr	Ni	Nb
1	24,94	40,39	3,52	28,05	3,11
2	13,77	24,07	0,40	60,67	1,10
3	21,78	0,75	1,06	76,41	—
4	6,20	3,01	24,56	66,23	—

кое содержание хрома в диффузионной зоне, а с другой стороны, обеспечивает формирование в центральной части диффузионной зоны интерметаллида, обогащенного никелем (Al_3Ni_5) (табл. 5, область анализа 3), что способствует снижению микротвердости материала до 6,8 ГПа.

2. Прослойка Cu-Al/Ni-Ni.

Диффузионную сварку γ -TiAl и никелевого сплава проводили через плакированную промежуточную прослойку Cu-Al/Ni-Ni, которая состоит из нанослойной фольги системы Al-Ni, соответствующего стехиометрии AlNi₃ и плакирующих слоев меди и никеля (табл. 2). Промежуточную прослойку размещали таким образом, чтобы слой меди контактировал с γ -TiAl, а слой никеля — с никелевым сплавом. Такое размещение прослойки предопределяется химическим сродством компонентов плакирующих слоев и сплавов.

Микроструктура соединения показана на рис. 6, а. Диффузионное перемешивание компонентов сплавов обеспечивает формирование диффузионной зоны, состоящей из слоев с разным фазовым составом (рис. 6, б, табл. 6), в которой медь концентрируется в области, близкой к интерметаллиду титана, что является следствием химического сродства титана и меди и, вероятно, формированием низкотемпературной эвтектической составляющей, что улучшает физический контакт свариваемых поверхностей.

На рис. 7 приведены значения микротвердости и коэффициента пластичности свариваемых спла-

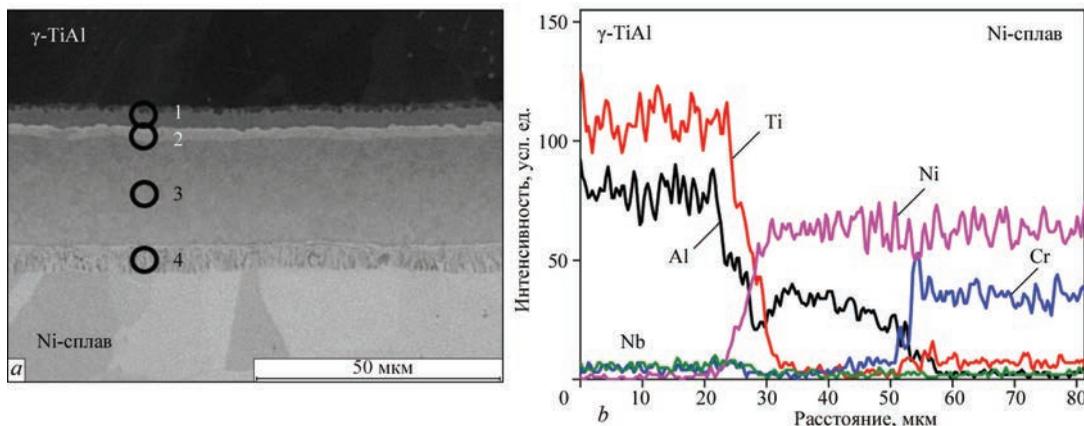


Рис. 5. Микроструктура (а) и распределение компонентов (б) соединения γ -TiAl — никелевый сплав, полученного с применением промежуточной плакированной прослойки Ni/Al-Ni-Ni

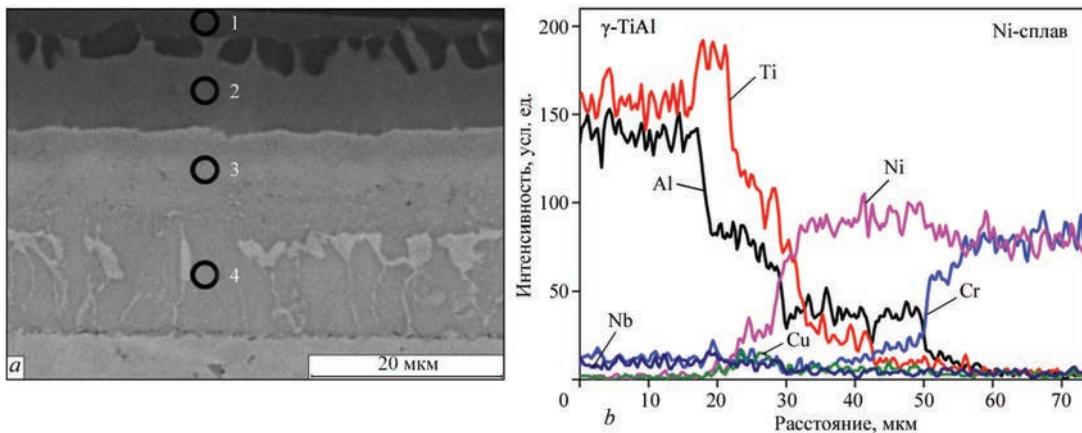


Рис. 6. Микроструктура (а) и распределение компонентов (б) соединения γ -TiAl — никелевый сплав, полученного с применением промежуточной плакированной прослойки Cu-Al/Ni-Ni

Таблица 6. Химический состав участков в зоне соединения, показанных на рис. 6, а

Область анализа	Химический состав зон соединения, мас. %						
	Al	Ti	Cr	Fe	Ni	Cu	Nb
1	22,74	62,65	6,24	—	1,63	3,07	3,66
2	25,38	39,19	4,70	—	16,48	11,32	2,94
3	15,34	10,45	2,37	0,92	67,40	3,51	—
4	16,14	4,69	4,92	1,96	72,30	—	—

что является следствием образования хрупких интерметаллидных фаз с высокой микротвердостью (до 14 ГПа) и фазы CrNi_2 .

2. Применение при диффузионной сварке сплава γ -TiAl с никелевым жаропрочным сплавом плакированной нанослойной промежуточной прослойки на основе системы Al-Ni обеспечивает образование бездефектных соединений благодаря формированию диффузионной зоны с монотонным характером распределения компонентов, снижению ее микротвердости.

Список литературы

1. Банных О.А., Поварова К.Б., Браславская Г.С. и др. (1996) Механические свойства литых сплавов γ -TiAl. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **1**, 11–14.
2. Полькин И.С., Колачев Б.А., Ильин А.А. (1997) Алюминиды титана и сплавы на их основе. *Технология легких сплавов*, **3**, 32–39.
3. Шоршоров М.Х., Ерохин А.А., Чернышова Т.А. (1973) *Горячие трещины при сварке жаропрочных сплавов*. Москва, Машиностроение.
4. Замков В.Н., Великоиваненко Е.А., Сабокарь В.К., Вржижевский Э.Л. (2001) Выбор температуры предварительного подогрева γ -алюминиды титана при ЭЛС. *Автоматическая сварка*, **11**, 20–23.
5. Peng He, Jun Wang, Tiesong Lin, Haixin Li. (2014) Effect of hydrogen on diffusion bonding of TiAl based intermetallics and Ni-based superalloy using hydrogenated $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ interlayer. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 1882–1887.
6. Li Z.F., Wu G.Q., Huang Z., Ruan Z.J. (2004) Diffusion bonding of laser surface modified TiAl alloy/Ni alloy. *Materials Letters*, **58**, 3470–3473.
7. Ramos A.S., Vieira M.T., Simoes S., Viana F., Vieira M.F. (2009) Joining of Superalloys to Intermetallics Using Nanolayers. *Advanced Materials Research*, **59**, 225–229.
8. Люшинский А.В. (2001) Критерии выбора промежуточных слоев при диффузионной сварке в вакууме разнородных материалов. *Сварочное производство*, **5**, 40–43.
9. Юштин А.Н., Замков В.Н., Сабокарь В.К., Чвертко П.Н., Петриченко И.К. (2001) Сварка давлением интерметаллидного сплава γ -TiAl. *Автоматическая сварка*, **1**, 33–37.
10. Ramos A.S., Vieira M.T., Simoes S., Viana F., Vieira M.F. (2010) Reaction-Assisted Diffusion Bonding of Advanced Materials. *Defect and Diffusion Forum*, **297–301**, 972–977.
11. Ustinov A.I., Falchenko Yu.V., Ishchenko A.Ya. et al. (2008) Diffusion welding of γ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, **8**, 1043–1045.

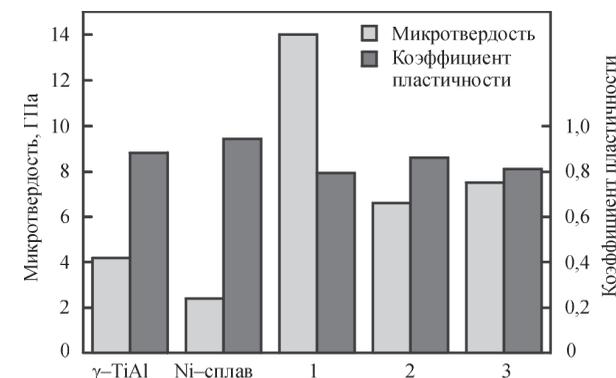


Рис. 7. Микротвердость и коэффициент пластичности сплава на основе γ -TiAl и никелевого сплава, а также их соединений, полученных диффузионной сваркой без промежуточной прослойки (1), с прослойкой Ni-Al/Ni-Ni (2) и Cu-Al/Ni-Ni (3) вов и диффузионной зоны соединений, полученных ДСВ без промежуточной прослойки и с плакированной промежуточной прослойкой разного состава. Видно, что применение плакированной нанослойной промежуточной прослойки позволяет снизить микротвердость материала в диффузионной зоне более, чем в два раза по сравнению с соединениями, полученными без промежуточной прослойки, при сохранении коэффициента пластичности на уровне основных материалов.

Выводы

1. При диффузионной сварке сплава γ -TiAl и жаропрочного никелевого сплава в соединении со стороны никелевого сплава формируются дефекты в виде протяженных участков растрескивания,

12. Ustinov A., Olikhovska L., Melnichenko T., Shyshkin A. (2008) Effect of overall composition on thermally induced solid-state transformations in thick EB PVD Al/Ni multilayers. *Surface and Coatings Technology*, **16**, 3832–3838.
13. Устинов А.И., Мельниченко Т.В., Шишкин А.Е. (2013) Деформационное поведение многослойных вакуумных конденсатов Ti/Al при нагреве в условиях постоянно действующих нагрузок. *Современная электрометаллургия*, **4**, 27–33.
14. Аникеев А.И., Верещака А.А., Верещака А.С., Бубликов Ю.И. (2015) Ультрадисперсные твердые сплавы как инструментальный материал для фрезерования труднообрабатываемых материалов. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион*, **3**, 152–162.
15. Устинов А.И., Фальченко Ю.В., Ищенко А.Я. и др. (2009) Получение неразъемных соединений сплавов на основе γ -TiAl с использованием многослойной наноструктурной фольги Ti/Al способом диффузионной сварки в вакууме. *Автоматическая сварка*, **1**, 17–21.
16. Устинов А.И., Олиховская Л.А., Мельниченко Т.В. и др. (2008) Твердофазные реакции при нагреве многослойных фольг Al/Ti, полученных методом электронно-лучевого осаждения. *Современная электрометаллургия*, **2**, 19–26.
17. Фирстов С.А., Горбань В.Ф., Печковский Э.П., Мамека Н.А. (2007) Уравнение индентирования. *Доповіді Національної академії наук України*, **12**, 100–106.
18. Zeng K., Schmid-Fetzer R., Huneau B. et al. (1999) The ternary system Al–Ni–Ti Part II: thermodynamic assessment and experimental investigation of polythermal phase equilibria. *Intermetallics*, **12**, 1347–1359.
19. Dyer T.S., Munir Z.A. (1995) The synthesis of nickel aluminides by multilayer self-propagating combustion. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **26**(3), 603–610.
- and Ni-based superalloy using hydrogenated Ti_6Al_4V interlayer. *Int. J. Hydrog. Energy*, 1882–1887.
6. Li, Z.F., Wu, G.Q., Huang, Z., Ruan, Z.J. (2004) Diffusion bonding of laser surface modified TiAl alloy/Ni alloy. *Materials Letters*, **58**, 3470–3473.
7. Ramos, A.S., Vieira, M.T., Simoes, S., Viana, F., Vieira, M.F. (2009) Joining of superalloys to intermetallics using nanolayers. *Advanced Materials Research*, **59**, 225–229.
8. Lyushinsky, A.V. (2001) Criteria of selection of intermediate layers in vacuum diffusion welding of dissimilar materials. *Svarochn. Proizvodstvo*, **5**, 40–43 [in Russian].
9. Yushtin, A.N., Zamkov, V.N., Sabokar, V.K. et al. (2001) Pressure welding of intermetallic alloy γ -TiAl. *The Paton Welding J.*, **1**, 33–37.
10. Ramos, A.S., Vieira, M.T., Simoes, S., Viana, F., Vieira, M.F. (2010) Reaction-assisted diffusion bonding of advanced materials. *Defect and Diffusion Forum*, 297–301, 972–977.
11. Ustinov, A.I., Falchenko, Yu.V., Ishchenko, A.Ya. et al. (2008) Diffusion welding of γ -TiAl based alloys through nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, **8**, 1043–1045.
12. Ustinov, A., Olikhovska, L., Melnichenko, T., Shyshkin, A. (2008) Effect of overall composition on thermally induced solid-state transformations in thick EB PVD Al/Ni multilayers. *Surface and Coatings Technology*, **16**, 3832–3838.
13. Ustinov, A.I., Melnichenko, T.V., Shishkin, A.E. (2013) Deformational behavior of multilayer Ti/Al foils at heating under the conditions of continuously applied loads. *Sovrem. Elektrometallurgiya*, **4**, 27–33 [in Russian].
14. Anikeev, A.I., Vereshchaka, A.A., Vereshchaka, A.S., Bublikov, Yu.I. (2015) Superdispersed hard alloys as a tool material for milling of hard-to-machine materials. *Izv. Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Povolzhsky Region*, **3**, 152–162 [in Russian].
15. Ustinov, A.I., Falchenko, Yu.V., Ishchenko, A.Ya. et al. (2009) Producing permanent joints of γ -TiAl based alloys using nanolayered Ti/Al interlayer by vacuum diffusion welding. *The Paton Welding J.*, **1**, 12–15.
16. Ustinov, A.I., Olikhovskaya, L.A., Melnichenko, T.V. et al. (2008) Solid-phase reactions in heating of multilayer Al/Ti foils produced by electron beam deposition method. *Advances in Electrometallurgy*, **2**, 19–26.
17. Firstov, S.A., Gorban, V.F., Pechkovsky, E.P., Mameka, N.A. (2007) Equation of indentation. *Dopovidi Nats. Akademii Nauk Ukrainy*, **12**, 100–106 [in Russian].
18. Zeng, K., Schmid-Fetzer, R., Huneau, B. et al. (1999) The ternary system Al–Ni–Ti. Pt II: Thermodynamic assessment and experimental investigation of polythermal phase equilibria. *Intermetallics*, **12**, 1347–1359.
19. Dyer, T.S., Munir, Z.A. (1995) The synthesis of nickel aluminides by multilayer self-propagating combustion. *Metallurgical and Materials Transact. B.*, **26**(3), 603–610.

References

1. Bannykh, O.A., Povarova, K.B., Braslavskaya, G.S. et al. (1996) Mechanical properties of cast alloys γ -TiAl. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **1**, 11–14 [in Russian].
2. Polkin, I.S., Kolachev, B.A., Ilin, A.A. (1997) Titanium aluminides and alloys on their base. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **3**, 32–39 [in Russian].
3. Shorshorov, M.Kh., Erokhin, A.A., Chernyshova, T.A. (1973) *Hot cracks in welding of high-temperature alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Zamkov, V.N., Velikoivanenko, E.A., Sabokar, V.K., Vrzhezhevsky, E.L. (2001) Selection of temperature of preheating of γ -titanium aluminide in electron beam welding. *The Paton Welding J.*, **11**, 17–20.
5. Peng He, Jun Wanga, Tiesong Lin, Haixin Li (2014) Effect of hydrogen on diffusion bonding of TiAl based intermetallics

ДИФУЗІЙНЕ ЗВАРЮВАННЯ У ВАКУУМІ ІНТЕРМЕТАЛІДА γ -TiAl
З ЖАРОМІЦНИМ НІКЕЛЕВИМ СПЛАВОМ
З ВИКОРИСТАННЯМ НАНОПРОШАРКІВ Al/Ni

Фальченко Ю.В., Петрушинець Л.В., Мельниченко Т.В., Устинов А.И., Федорчук В.С.

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Вивчено вплив структурних характеристик та хімічного складу нанощаруватих проміжних прошарків на основі системи Al–Ni на формування з'єднань сплаву на основі γ -TiAl та жароміцного нікелевого сплаву при дифузійному зварюванні у вакуумі. Показано, що застосування нанощаруватих плакованих проміжних прошарків забезпечує формування дифузійної зони з монотонною зміною вмісту компонентів, фазовий склад і мікромеханічні характеристики якої визначаються хімічним складом проміжного прошарку, а також знижує ймовірність формування крихких фаз в стику. Бібліогр. 19, табл. 6, рис. 7.

Ключові слова: дифузійне зварювання в вакуумі, інтерметаліди, нанощаруваті прошарки

VACUUM DIFFUSION WELDING OF γ -TiAl INTERMETALLIC WITH HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOY WITH APPLICATION OF INTERMEDIATE AL/NI NANOLAYERS

Iu.V. Falchenko, L.V. Petrushynets, T.V. Melnichenko, A.I. Ustinov, V.E. Fedorchuk

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazymyr Malevych Str., 03680, Kyiv. E-mail: office@paton.kiev.ua

Effect of structural characteristics and chemical composition of intermediate nanolayers based on Al-Ni system on formation of joints of γ -TiAl based alloy and high-temperature nickel alloy in vacuum diffusion welding was studied. It is shown that application of nanolayered clad interlayers ensures formation of a diffusion zone with monotonic change of the content of components, where the phase composition and micromechanical characteristics are determined by the interlayer chemical composition, as well as lowers the probability of brittle phase formation in the butt joint. 19 Ref., 6 Tabl., 7 Fig.

Keywords: vacuum diffusion welding, intermetallics, nanolayered interlayers

Поступила в редакцию 10.07.2019

МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ



Газоразрядные электронно-лучевые пушки производства компании «ЧЕРВОНА ХВИЛЯ»

- ▶ работают в широком диапазоне мощностей (от 30 до 600 кВт), что позволяет проектировать оптимальное оборудование для каждого конкретного применения
- ▶ обеспечивают стабильную работу в широком диапазоне вакуума и парциального давления газов (от 10^{-4} до 10^{-1} мбар), в том числе в условиях динамично изменяющегося остаточного давления в технологической камере
- ▶ компактны, небольшого веса, просты и надежны в эксплуатации
- ▶ катоды пушек имеют значительный срок службы — 1000 ч и более