

Научная статья
УДК 620.22
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.039

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИФфуЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА МЕЖСЛОЙНОЙ ГРАНИЦЕ СВАРЕННОГО ВЗРЫВОМ КОМПОЗИТА Ti-NiCr

**Виталий Павлович Кулевич¹, Артем Игоревич Богданов², Виктор Георгиевич Шморгун³,
Эмиль Русланович Камалов⁴**

^{1–4}Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

¹kulevich.vp@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6041-8423>

²bogdanov@vstu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3918-775X>

³vgshmorgun@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3282-2880>

⁴emil.kamalov20011@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты исследования процессов диффузионного взаимодействия на межслойной границе сваренных взрывом композиций системы Ti-NiCr при термообработке. Изучены структура, химический и фазовый состав формирующихся диффузионных зон. Установлено, что замена технически чистого титана на легированные титановые сплавы не оказывает влияния на фазовый состав формирующихся диффузионных зон, но замедляет диффузионные процессы.

Ключевые слова:

сварка взрывом, нихром, титан, диффузия, интерметаллиды

Финансирование:

исследование выполнено по гранту Российского научного фонда № 21-79-10246, <https://rscf.ru/project/21-79-10246>.

Для цитирования:

Исследование процессов диффузионного взаимодействия на межслойной границе сваренного взрывом композита Ti-NiCr / В. П. Кулевич [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 3. С. 216–221. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.039.

Original article

INVESTIGATION OF DIFFUSION INTERACTION PROCESSES AT THE INTERLAYER BOUNDARY OF EXPLOSION WELDED Ti-NiCr COMPOSITE

Vitaly P. Kulevich¹, Artem I. Bogdanov², Viktor G. Shmorgun³, Emil R. Kamalov⁴

^{1–4}Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹kulevich.vp@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-6041-8423>

²bogdanov@vstu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3918-775X>

³vgshmorgun@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3282-2880>

⁴emil.kamalov20011@mail.ru

Abstract

The results of studying the diffusion interaction processes at the interlayer boundary of explosively welded the Ti-NiCr system composites during heat treatment are presented. The structure, chemical and phase composition of the emerging diffusion zones have been studied. It has been established that the replacement of commercially pure titanium with alloyed titanium alloys does not affect the phase composition of the emerging diffusion zones, but slows down the diffusion processes.

Keywords:

explosion welding, nichrome, titanium, diffusion, intermetallics

Funding:

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 21-79-10246, <https://rscf.ru/project/21-79-10246>.

For citation:

Investigation of diffusion interaction processes at the interlayer boundary of explosion welded Ti-NiCr composite / V. P. Kulevich [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 3. P. 216–221. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.3.039.

Введение

Повышение жаро- и износостойкости титановых сплавов возможно путем создания на их поверхности функционально-градиентных интерметаллидных покрытий на основе легированных алюминидов никеля и хрома [1–2]. Для формирования таких покрытий была предложена технология,

предусматривающая нанесение на поверхность титана (титанового сплава) сваркой взрывом (СВ) барьерного слоя нихрома (сплав Х20Н80), с последующим алитированием полученной заготовки погружением в расплав алюминия [3]. При этом важно понимать особенности диффузионного взаимодействия титана и нихрома при повышенных температурах в условиях термообработки покрытий и эксплуатационных нагревов. Много работ посвящено исследованию кинетики взаимодействия титана с никелем при различных температурах и образующихся диффузионных зон [4–7]. Известны работы, посвященные формированию композиций Ti-NiCr [8–10], однако вопрос диффузионного взаимодействия в данных композициях практически не изучен.

Целью настоящей работы стало исследование особенностей диффузионного взаимодействия на границе соединения сваренных взрывом слоистых композитов системы Ti-NiCr в условиях высокотемпературной обработки.

Материалы и методика эксперимента

Исследования проводили на композициях Х20Н80 + ВТ1-0, Х20Н80 + ОТ4 и Х20Н80 + ВТ20, полученных сваркой взрывом. Сведения о химическом составе титановых сплавов и нихрома Х20Н80 приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав титановых сплавов, мас. %

	Ti	Al	V	Mo	Zr	Mn	Si	Fe
ВТ1-0	98,6–99,7	–	–	–	–	–	<0,1	<0,18
ОТ4	91,6–95,7	3,5–5	–	–	<0,3	0,8–2	<0,15	<0,3
ВТ20	84,9–91,7	5,5–7	0,8–2,5	0,5–2	1,5–2,5	–	<0,15	<0,3

Таблица 2

Химический состав нихрома Х20Н80, мас. %

Al	C	Cr	Fe	Mn	Ni	P	S	Si	Ti	Zr
≤0,20	≤0,06	20,0–23,0	≤1,0	≤0,6	основа	≤0,02	≤0,015	1,0–1,5	≤0,2	0,2–0,5

Термообработку образцов размером 10×10 мм проводили в печи СНОЛ 8.2/1100 в атмосфере воздуха при температурах от 700 до 850 °С. Нижняя граница режимов соответствует максимальной температуре, не превышающей температуру эвтектоидного превращения в системе Ti-Ni, а верхняя граница — температуре, не превышающей температуру фазового перехода чистого титана. Время выдержки образцов изменяли от 1 до 100 ч.

Металлографические исследования осуществляли с применением оптической (модульный моторизованный микроскоп Olympus BX61 с фиксацией изображения цифровой камерой DP-12) и электронной (растровый электронный микроскоп Versa 3D) микроскопии. Анализ химического состава проводили на электронном микроскопе Versa 3D с использованием энергодисперсионного спектрометра EDAX Trident XM 4 (ЭДС). Рентгеноструктурный анализ (РСА) выполняли на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE ECO.

Результаты и их обсуждение

По результатам проведенных испытаний были построены графические зависимости толщины формирующейся диффузионной зоны (ДЗ) от температуры и времени испытаний (рис. 1). При температуре ниже фазового перехода титана кинетика роста ДЗ для композиции с технически чистым титаном (Х20Н80 + ВТ1-0) максимальна. В композиции с легированным титаном Х20Н80 + ОТ4 скорость роста ДЗ примерно на 10 % ниже, а в Х20Н80 + ВТ20 более чем в 2 раза ниже, чем в Х20Н80 + ВТ1-0.

При температуре выше фазового перехода титана (850 °С) отмечена значительная интенсификация диффузионных процессов. Вместе с этим максимальную скорость роста ДЗ показала композиция Х20Н80 + ОТ4, а минимальную — Х20Н80 + ВТ20.

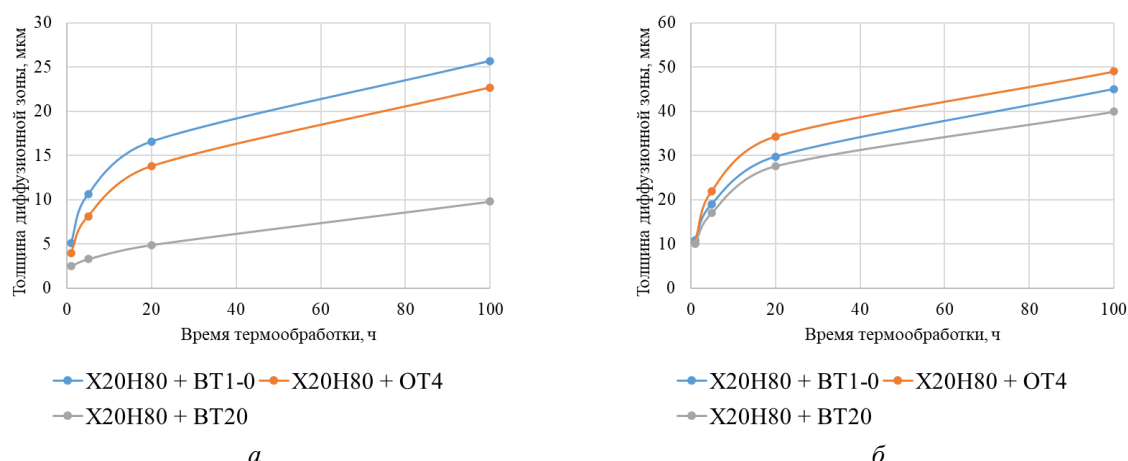


Рис. 1. Кинетика диффузионного взаимодействия при температуре 700 (а) и 850 °С (б)

Металлографические исследования показали, что в композиции X20H80 + BT1-0 при температуре 700 °С на границе соединения формируется слоистая ДЗ, состоящая из четырех четко различимых областей (рис. 2, а). Точечный энергодисперсионный анализ (рис. 2, з) позволил установить, что со стороны титанового слоя формируется сплошной слой интерметаллида Ti_2Ni , после которого находится прослойка интерметаллида $TiNi$, составляющая большую часть ДЗ. Со стороны нихрома располагаются две области, одна из которых представляет собой включения твердого раствора титана в хrome, разделенные тонкими прослойками интерметаллида $TiNi_3$, а вторая соответствует слою интерметаллида $TiNi_3$ переменной толщины. Распределение химических элементов в поперечном сечении показало отсутствие диффузии элементов в нихром и титан.

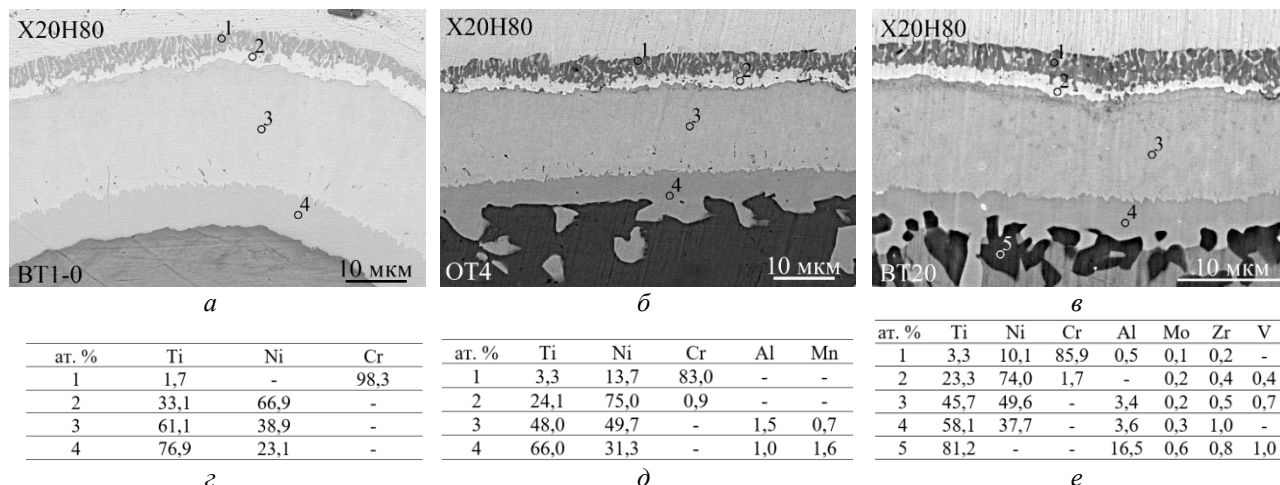


Рис. 2. Структура диффузионной зоны на границе X20H80 + BT1-0 (а), X20H80 + OT4 (б) и X20H80 + BT20 (в) после 700 °С, 100 ч (а) и результаты точечного энергодисперсионного анализа (z, d, e)

В случае композиции X20H80 + OT4 при температуре 700 °С формируется аналогичная ДЗ, в которой вместо бинарных интерметаллидов системы Ti-Ni образовались твердые растворы на их основе (рис. 2, б). Образование твердых растворов на базе $TiNi$ и Ti_2Ni произошло за счет диффузии легирующих компонентов из сплава OT4, то есть Al и Mn. Принципиальным отличием в ДЗ по сравнению с композицией X20H80 + BT1-0 является образование в титановом слое включений интерметаллида Ti_2Ni . Также отмечено отсутствие светлых включений в структуре титана на расстоянии около 50 мкм от ДЗ, что обусловлено снижением концентрации Mn в этой области.

В композиции X20H80 + BT20 после 700 °С не отмечено принципиальных отличий в структуре диффузионной зоны (рис. 2, *в*). На базе интерметаллидов TiNi и Ti₂Ni образовались твердые растворы, содержащие Al, Mo, V, Zr. По границе с диффузионной зоной в титане сформировались области с повышенным содержанием Al, достигающим 16 ат. %.

Проведение термообработки при температуре выше эвтектоидного превращения привело к качественным изменениям структуры ДЗ и титана. Изучение микроструктуры ДЗ в композиции X20H80 + BT1-0 (рис. 3, *а*) показало, что после термообработки при 850 °С происходит значительная интенсификация диффузионных процессов и изменение соотношения толщин составляющих слоев в сравнении с термообработкой при 700 °С. Доля прослойка со стороны нихрома в составе диффузионной зоны значительно увеличилась, вместе с этим выросла и доля интерметаллида TiNi₃ в ее составе. По границе интерметаллидов TiNi и Ti₂Ni появилась переходная область, соответствующая смеси этих фаз. Химический состав фаз в составе ДЗ при этом остался неизменным.

Термообработка при 850 °С привела к активной диффузии никеля в титан, растворимость которого в βTi может достигать 10 ат. %, и образованию после охлаждения эвтектоидной смеси (Ti+Ti₂Ni). Протяженность области с постепенно снижающимся содержанием никеля превышает 500 мкм после 100 ч выдержки.

Структура ДЗ в композиции X20H80 + OT4 (рис. 3, *б*) схожа с композицией X20H80 + BT1-0, а различается, как и после 700 °С, образованием твердых растворов на базе интерметаллидов TiNi и Ti₂Ni. Диффузия никеля в титан OT4 привела к формированию эвтектоидной структуры на глубину почти 400 мкм после 100 ч выдержки. Максимальное содержание никеля у границы диффузионной зоны составило 5 ат. %. Из-за мелкой дисперсности структуры произошло более равномерное распределение Al и Mn в данной области.

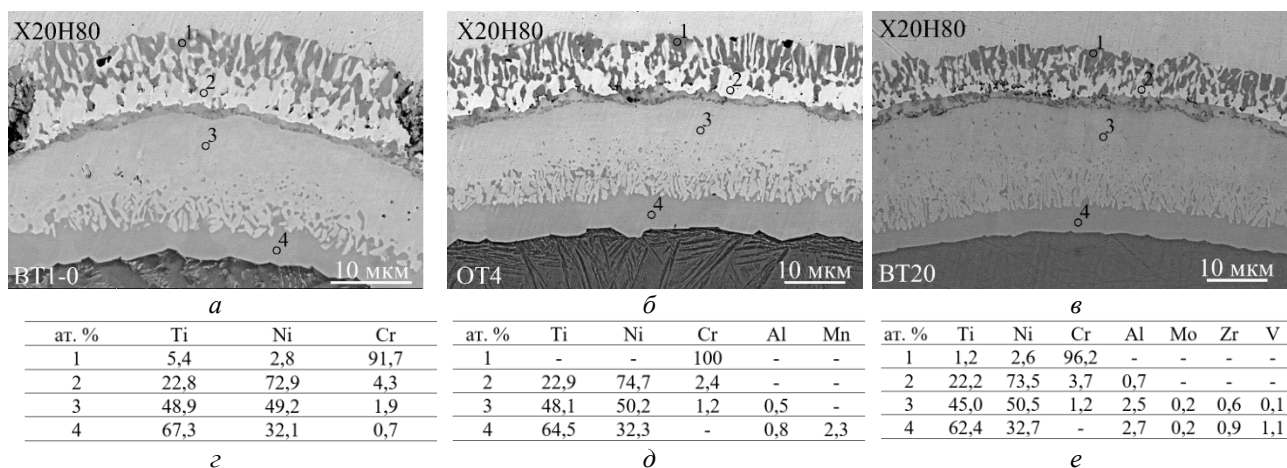


Рис. 3. Структура диффузионной зоны на границе X20H80 + BT1-0 (*а*), X20H80 + OT4 (*б*) и X20H80 + BT20 (*в*) после 850 °С, 20 ч (*а*) и результаты точечного энергодисперсионного анализа (*з*, *д*, *е*)

В композиции X20H80 + BT20 после термообработки при 850 °С (рис. 3, *в*) не отмечено принципиальных отличий в структуре ДЗ. Диффузия никеля в титан BT20 значительно замедляется в сравнении со сплавами BT1-0 и OT4. Максимальное содержание никеля у границы ДЗ не превышает 4 ат. %, а глубина, на которую продиффундировал, никель не превышает 300 мкм после 100 ч выдержки.

Выводы

Замена технически чистого титана на титановые сплавы в сваренных взрывом композициях системы Ti-NiCr практически не оказывает влияния на структуру и фазовый состав диффузионной зоны, формирующейся на границе соединения при термообработке, но замедляет диффузионные процессы.

При термообработке ниже температуры эвтектичного превращения диффузионные процессы локализуются на границе соединения и приводят к формированию слоистой диффузионной зоны, состоящей из твердых растворов на основе интерметаллидов Ti_2Ni , $TiNi$ и $TiNi_3$, а также включений твердого раствора на основе хрома по границе с X20H80.

Повышение температуры термообработки выше эвтектичного превращения интенсифицирует рост диффузионной зоны, не оказывая влияния на ее состав, а также приводит к диффузии никеля в титановый сплав и формированию в нем эвтектичной структуры, протяженность которой почти в 10 раз превышает толщину диффузионной зоны.

Список источников

1. Structure and oxidation behavior of γ -TiAl coating produced by laser cladding on titanium alloy / I. N. Maliutina [et al.] // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 319. P. 136–144.
2. Aluminizing of TiAl-based alloy using thermal spray coating / T. Sasaki [et al.] // Surface and Coatings Technology. 2011. Vol. 205, No. 13–14. P. 3900–3904.
3. Microstructure and phase composition of diffusion coating formed in NiCr alloys by hot-dip aluminizing / V. G. Shmorgun [et al.] // Surfaces and Interfaces. 2021. Vol. 23. P. 100988.
4. Formation of the Interaction Zone on the Interlayer Boundary of the Explosion-Welded Composite VT1-0–NP2 / V. G. Shmorgun [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. 2020. Vol. 11. P. 98–102.
5. Diffusion bonding of Ti/Ni under the influence of an electric current: mechanism and bond structure / X. Gao [et al.] // J. Materials Science. 2017. Vol. 52. P. 3535–3544.
6. Investigating the solid-state diffusion at the interface of Ni/Ti laminated composite / J. Luo [et al.] // J. Manufacturing Processes. 2022. Vol. 75. P. 670–681.
7. Diffusivity of Ti-Ni diffusion couple enhanced by pulse current during spark plasma sintering / R. Li [et al.] // Metallurgical and Materials Transactions B. 2020. Vol. 51. No. 1. P. 6–10.
8. Effect of interlayer on interfacial microstructure and properties of Ni80Cr20/TC4 vacuum diffusion bonded joint / S. Jian [et al.] // Vacuum. 2023. Vol. 208. P. 111738.
9. Liu K., Li Y., Wang J. Vacuum diffusion bonding TC4 to Ni80Cr20: Interfacial microstructure, segregation, cracking and properties // Vacuum. 2018. Vol. 158. P. 218–222.
10. Microstructure Characteristics of Transient Liquid Phase Diffusion Bonding Super-Ni/NiCr Laminated Composite to TC4 Alloy / X. Xiaohan [et al.] // Science of Advanced Materials. 2019. Vol. 11, No. 9. P. 1252–1258.

References

1. Maliutina I. N., Si-Mohand H., Sijobert J., Bertrand P., Lazurenko D. V., Bataev I. A. Structure and oxidation behavior of γ -TiAl coating produced by laser cladding on titanium alloy. Surface and Coatings Technology, 2017, Vol. 319, pp. 136–144.
2. Sasaki T., Yagi T., Watanabe T., Yanagisawa A. Aluminizing of TiAl-based alloy using thermal spray coating. Surface and Coatings Technology, 2011, Vol. 205, No. 13–14, pp. 3900–3904.
3. Shmorgun V. G., Bogdanov A. I., Kulevich V. P., Iskhakova L. D., Taube A. O. Microstructure and phase composition of diffusion coating formed in NiCr alloys by hot-dip aluminizing. Surfaces and Interfaces, 2021, Vol. 23, p. 100988.
4. Shmorgun V. G., Slautin O. V., Kulevich V. P., Serov A. G. Formation of the Interaction Zone on the Interlayer Boundary of the Explosion-Welded Composite VT1-0–NP2. Inorganic Materials: Applied Research, 2020, Vol. 11, pp. 98–102.
5. Gao X., Chen S., Dong F., Hu L., Yang R., Wang W., Munir Z. A. Diffusion bonding of Ti/Ni under the influence of an electric current: mechanism and bond structure. Journal of Materials Science, 2017, Vol. 52, pp. 3535–3544.
6. Luo J., Yarigaravesh M., Assari A. H., Amin N. H., Tayyebi M., Paidar M. Investigating the solid-state diffusion at the interface of Ni/Ti laminated composite. Journal of Manufacturing Processes, 2022, Vol. 75, pp. 670–681.
7. Li R., Niu P., Deng S., Yuan T., Liu G. Diffusivity of Ti-Ni diffusion couple enhanced by pulse current during spark plasma sintering. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020, vol. 51, pp. 6–10.
8. Jian S., Liu K., Li J., Wang H., Chen Z., Bokuchava G. Effect of interlayer on interfacial microstructure and properties of Ni80Cr20/TC4 vacuum diffusion bonded joint. Vacuum, 2023, vol. 208, p. 111738.
9. Liu K., Li Y., Wang J. Vacuum diffusion bonding TC4 to Ni80Cr20: interfacial microstructure, segregation, cracking and properties. Vacuum, 2018, Vol. 158, pp. 218–222.

10. Xiaohan X., Yajiang L., Kun L., Juan W. Microstructure Characteristics of Transient Liquid Phase Diffusion Bonding Super-Ni/NiCr Laminated Composite to TC4 Alloy. *Science of Advanced Materials*, 2019, Vol. 11 (9), pp. 1252–1258.

Информация об авторах

В. П. Кулевич — кандидат технических наук, преподаватель;

А. И. Богданов — кандидат технических наук, доцент;

В. Г. Шморгун — доктор технических наук, профессор.

Э. Р. Камалов — студент.

Information about the authors

V. P. Kulevich — PhD (Engineering), Lecturer;

A. I. Bogdanov — PhD (Engineering), Associate Professor;

V. G. Shmorgun — Dr. Sc. (Engineering), Professor.

E. R. Kamalov — Student.

Статья поступила в редакцию 30.01.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.
The article was submitted 30.01.2023; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.