

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 620.22

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-6-289-7-11

*В. Г. Шморгун, А. И. Богданов, В. П. Кулевич, Р. Д. Евчиц,
М. А. Разуваев, Н. Д. Родимина, М. А. Бочкарев*

К ВОПРОСУ О ПРЕИМУЩЕСТВЕННОМ МАССОПЕРЕНОСЕ НА ГРАНИЦЕ СВАРЕННЫХ ВЗРЫВОМ КОМПОЗИЦИЙ ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ+НИХРОМ*

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: bogdanov@vstu.ru

Приведены результаты исследований преимущественного массопереноса на границе сваренных взрывом композиций X20N80+BT1-0, X20N80+OT4 и X20N80+BT20. Установлено, что структура межфазной границы практически не зависит от временных параметров стабилизирующей термообработки и определяется ее температурой. Основное влияние на фазовый и химический состав зоны диффузионного взаимодействия, формирующейся при нагреве на Ti-NiCr границе, оказывает степень легирования титанового сплава. Градиент диффузии при этом преимущественно направлен в сторону титана BT1-0 и его сплавов OT4 и BT20.

Ключевые слова: сварка взрывом, оплавленный металл, титан, нихром, ЭДС анализ, РФА

*V. G. Shmorgun, A. I. Bogdanov, V. P. Kulevich, R. D. Evchits,
M. A. Razuvaev, N. D. Rodimina, M. A. Bochkarev*

ON THE QUESTION OF PRIMARY MASS TRANSFER AT THE BOUNDARY OF EXPLOSIVELY WELDED TITANIUM ALLOY+NICHROME COMPOSITIONS*

Volgograd State Technical University

The results of studies of preferential mass transfer at the boundary of explosion-welded compositions X20N80+VT1-0, X20N80+OT4 and X20N80+VT20 are presented. It has been established that the structure of the interphase boundary is practically independent of the time parameters of the stabilizing heat treatment and is determined by its temperature. The main influence on the phase and chemical composition of the diffusion interaction zone formed during heating at the Ti-NiCr boundary is the degree of alloying of the titanium alloy. In this case, the diffusion gradient is predominantly directed towards titanium VT1-0 and its alloys OT4 and VT20.

Keywords: explosion welding, molten metal, titanium, nichrome, EDS analysis, XRD

Увеличение срока службы изделий из титановых сплавов, работающих в экстремальных условиях при высоких температурах в агрессивных средах, всегда являлось актуальной задачей материаловедения. Решение этой задачи наиболее часто достигается путем создания на поверхности титановых сплавов функциональных покрытий. Разработанный на кафедре «Материаловедение и композиционные материалы» ВолГТУ технологический процесс создания жаростойких покрытий на основе ле-

гированных алюминидов никеля предусматривает получение с помощью сварки взрывом (СВ) композиционной заготовки титановый сплав+нихром и ее последующее алитирование в расплаве алюминия [1]. Слой нихрома в составе такого покрытия с одной стороны играет роль диффузионного барьера, предотвращающего проникновение атомов алюминия в защищаемую основу, а с другой стороны – обеспечивает высокий уровень адгезии алюминидного покрытия к титановой основе. На по-

© Шморгун В. Г., Богданов А. И., Кулевич В. П., Евчиц Р. Д., Разуваев М. А., Родимина Н. Д., Бочкарев М. А., 2024.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10246, <https://rscf.ru/project/21-79-10246/>

верхности покрытия в процессе эксплуатации формируется плотная оксидная пленка, которая и обуславливает стойкость изделия к высокотемпературной коррозии. Эксплуатационная надежность такого покрытия отчасти определяется кинетикой формирования в результате протекания при нагревах зон диффузионного взаимодействия (ДЗ) между титановым сплавом и подслоем нихрома [2–4].

Материалы и методы исследования

Исследования проводили на биметаллических композитах X20H80+BT1-0, X20H80+OT4 и X20H80+BT20, полученных СВ. Для исследования ранних этапов формирования ДЗ и определения направления преимущественного массопереноса на границе сваренных взрывом композиций были проведены нагревы образцов непосредственно в колонне электронного микроскопа Versa 3D при температуре наиболее интенсивной диффузии – 850 °С в среде Ar.

Металлографические исследования осуществляли с применением электронной (растровый электронный микроскоп Versa 3D) микро-

скопии. Анализ химического состава проводили на электронном микроскопе Versa 3D с использованием энергодисперсионного спектрометра EDAX Trident XM 4 (ЭДС).

Результаты и их обсуждение

В композите X20H80 + BT1-0 для исследований был выбран участок границы соединения, где одновременно имеется сформировавшийся в результате СВ оплавленный металл и свободная от оплава зона контакта титана с нихромом (рис. 1, а). После ионной полировки поверхности исследуемого участка на фоне сильно деформированных в результате интенсивной пластической деформации при СВ зерен можно наблюдать участки физической микро-неоднородности в виде зон с рекристаллизованной структурой. Причем наиболее выражено в структуре X20H80, что связано с его более низким по отношению к BT1-0 порогом рекристаллизации. На рис. 1 также приведены результаты ЭДС анализа распределения химических элементов на исследуемом участке с оплавленным металлом (рис. 1, б) и без него (рис. 1, в).

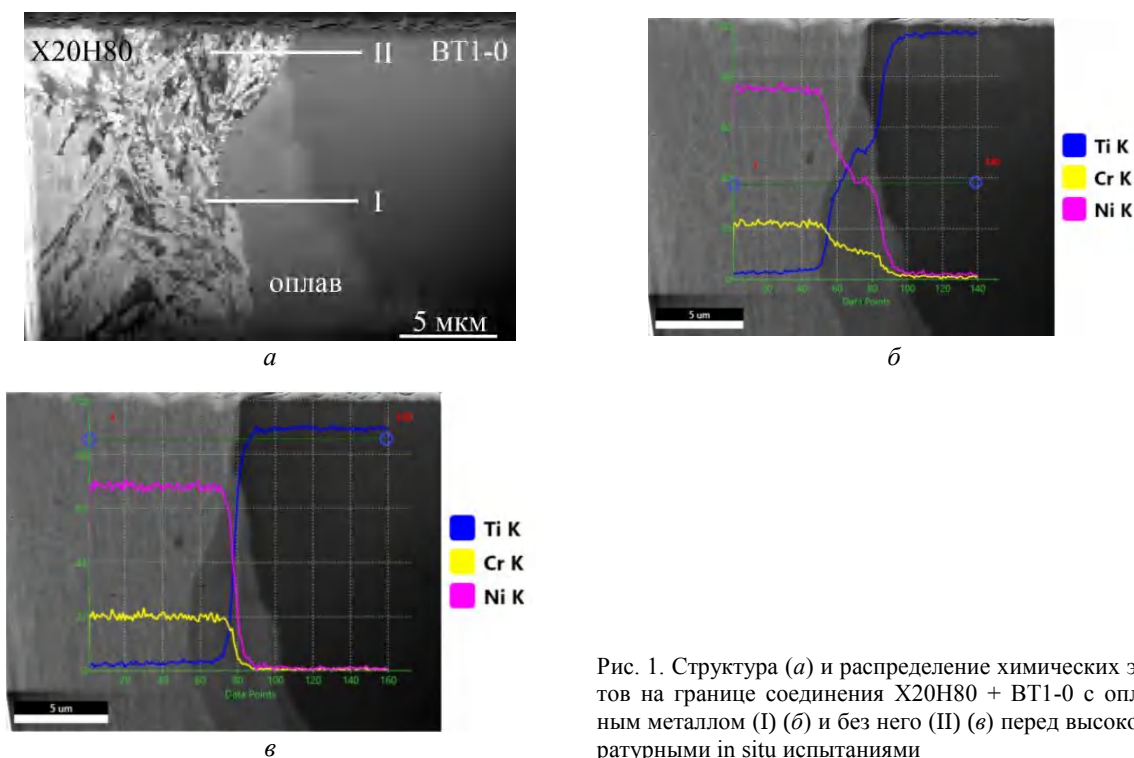


Рис. 1. Структура (а) и распределение химических элементов на границе соединения X20H80 + BT1-0 с оплавленным металлом (I) (б) и без него (II) (в) перед высокотемпературными *in situ* испытаниями

В процессе нагрева композиции X20H80 + BT1-0 по реперным точкам было установлено, что рост ДЗ происходит преимущественно за счет изменения толщины слоя BT1-0, т. е. градиент диффузии направлен в сторону титана

(рис. 2). В месте расположения оплава растущая ДЗ повторяет его контур. Диффузионные процессы протекают на границах «X20H80-оплав» и «оплав-BT1-0» без поглощения оплава.

Стоит отметить, что в результате кристаллохимических превращений рост ДЗ сопровождается объемными изменениями, которые, в свою очередь, вследствие наличия свободной

поверхности, приводят к специфическому «выпячиванию» ДЗ над наблюдаемой поверхностью образца. Такая картина наблюдается для всех исследованных Ti-NiCr систем (рис. 2, 4, 6).

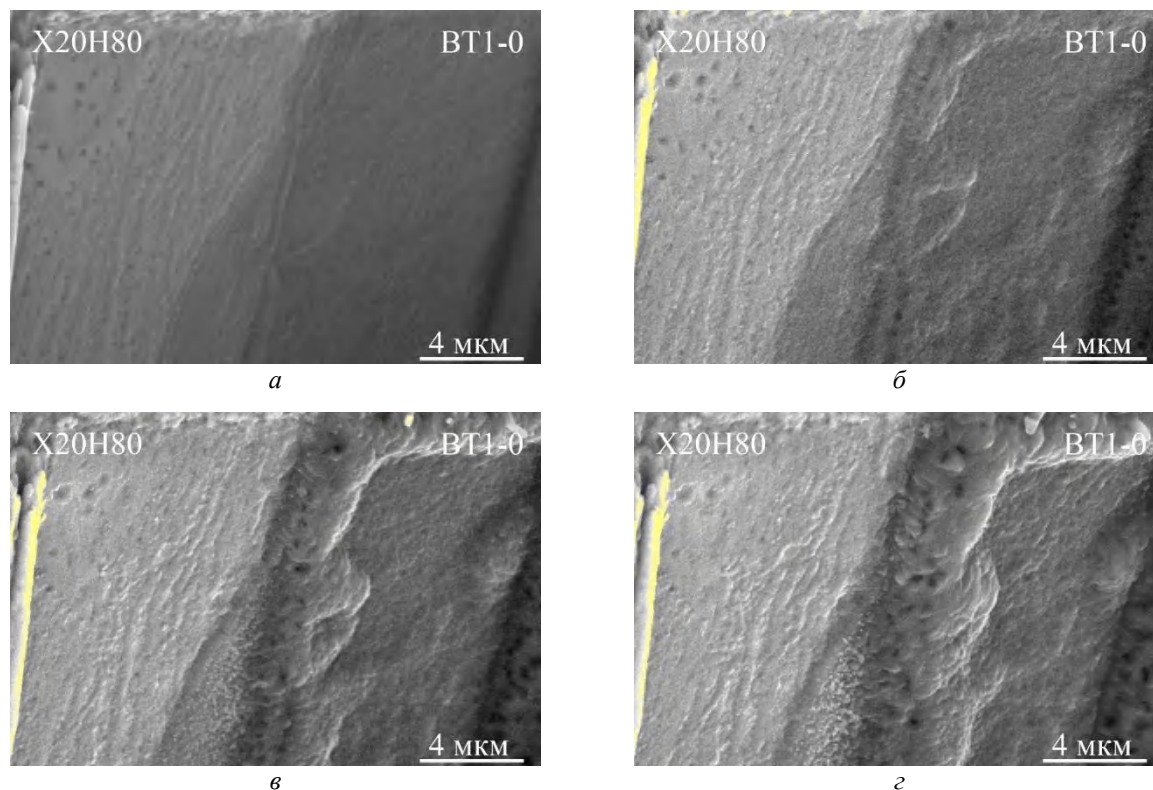
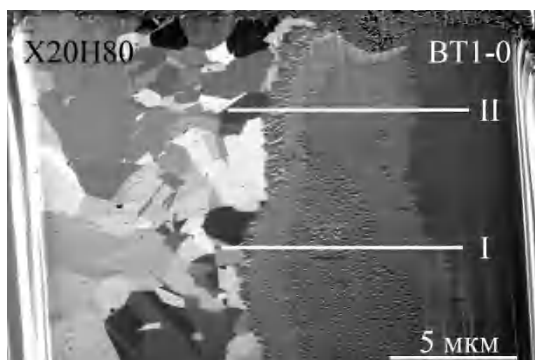


Рис. 2. СЭМ изображения границы соединения X20H80 + BT1-0 в процессе нагрева при 850 °С в течение 1 (а), 15 (б), 50 (в) и 90 (г) мин (in situ)

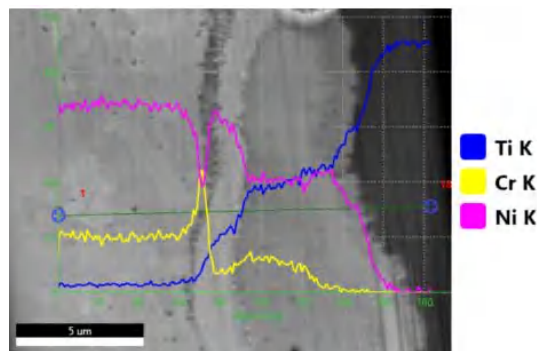
После окончания испытаний (максимальное время выдержки составляло 90 мин) в стандартных условиях работы электронного микроскопа контролировали состав и структуру сформированной in situ ДЗ (рис. 3). Анализ показал, что последние как в случае наличия участка оплавленного металла, так и в случае его отсутствия, не отличаются от ранее установленных для образцов после стандартного печного нагрева. Можно также отметить изменения, связанные с протеканием процессов рекристаллизации по всему объему образца, что выражается в характерной структуре сплава X20H80 (рис. 3).

Важной особенностью структуры ДЗ явля-

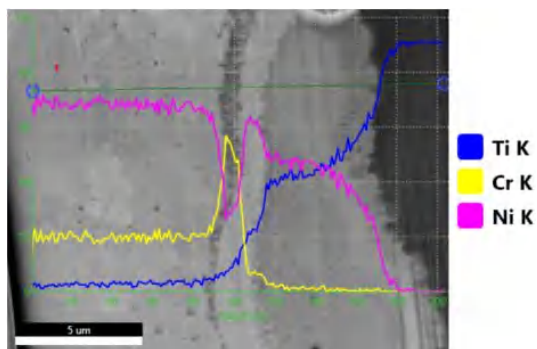
ется формирование на границе с X20H80 зоны с включениями с высоким содержанием Cr, так называемых, преципитатов («Cr-rich precipitate»). Причем это процесс наиболее выражен на участке границы соединения, свободном от оплавленного металла, т. е. там, где начальное содержание хрома в зоне взаимодействия компонентов соответствовало его содержанию в сплаве X20H80 (20 мас. %). Формирование таких включений наиболее вероятно связано с ограниченной растворимостью Cr в интерметаллидах системы Ti-Ni. Аналогичные in situ исследования были проведены и для других Ti-NiCr систем: X20H80+OT4 (рис. 4, 5) и X20H80+BT20 (рис. 6, 7).



а

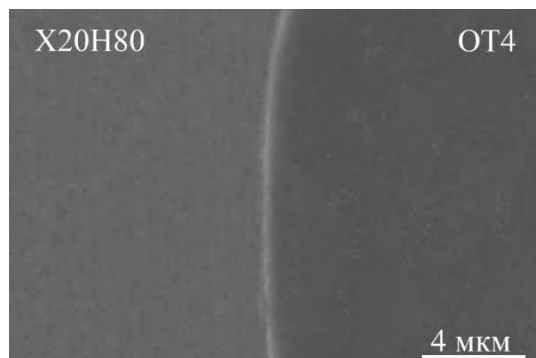


б

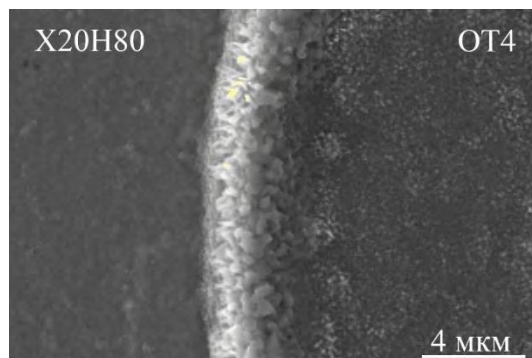


в

Рис. 3. Структура (а) и распределение химических элементов на границе соединения X20H80 + VT1-0 с оплавленным металлом (I) (б) и без него (II) (в) после высокотемпературных *in situ* испытаний (850 °C, 90 мин)



а

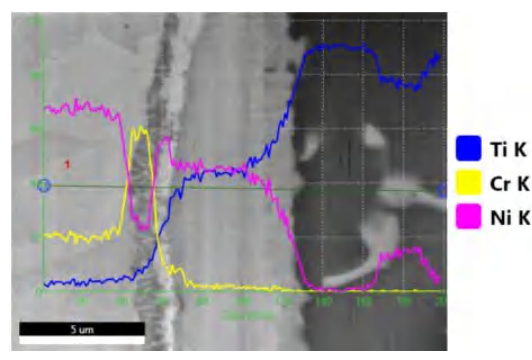


б

Рис. 4. СЭМ изображения границы соединения X20H80+OT4 в процессе нагрева при 850 °C в течение 1 (а) и 90 (б) мин (*in situ*)



а



б

Рис. 5. СЭМ изображение границы соединения X20H80+OT4 после нагрева при 850 °C, 90 мин (а) и распределение химических элементов по толщине ДЗ (б)

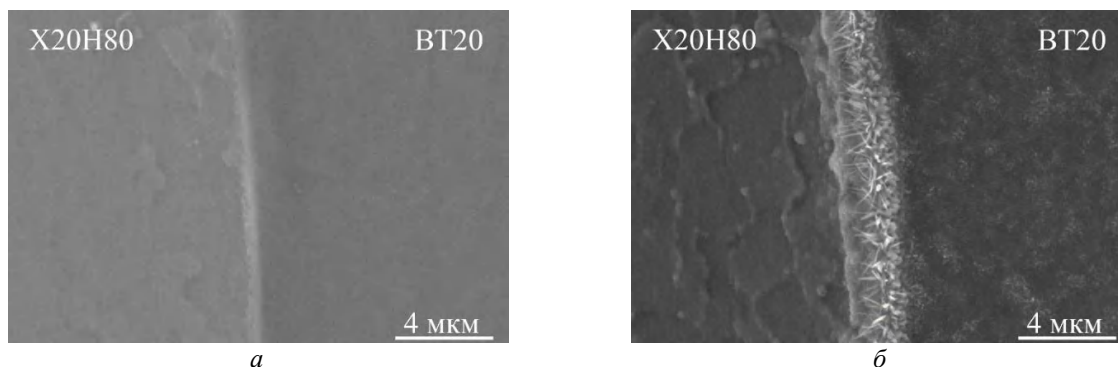


Рис. 6. СЭМ изображения границы соединения X20H80+BT20 в процессе нагрева при 850 °С в течение 1 (а) и 90 (б) мин (in situ)

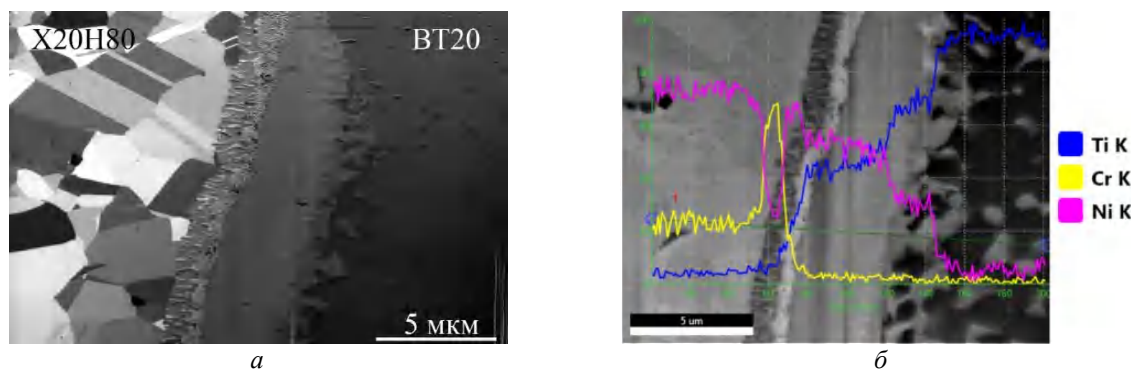


Рис. 7. СЭМ изображение границы соединения X20H80+BT20 после нагрева при 850 °С, 90 мин (а) и распределение химических элементов по толщине ДЗ (б)

Анализ полученных результатов позволяет сделать аналогичные (по сравнению с композицией X20H80+BT1-0) выводы о неизменности состава и структуры формируемых ДЗ в сравнении с образцами после стандартного печного нагрева. Установлено, что градиент диффузии при ТО преимущественно направлен в сторону титановых сплавов ОТ4 и BT20. Сравнение данных по толщинам сформированных ДЗ подтверждает сделанные ранее выводы о торможении диффузионных процессов с увеличением степени легирования титанового сплава. Кроме того, как и в случае X20H80+BT1-0, интенсивно протекают процессы рекристаллизации сильнодеформированной в результате СВ структуры сплавов, а также формирование в результате взаимной диффузии элементов зоны Сг преципитатов на границе с нихромом.

Как можно видеть из рис. 2 а, 4 б и 6, б во всех случаях наблюдается окисление поверхности как сплавов, так и формирующейся при нагреве ДЗ. Причем наиболее выражен этот процесс для композиции X20H80+BT20. Такой эффект, вероятно, обусловлен двумя факторами: недостаточной степенью чистоты используемого при *in situ* испытаниях Аг и высоким сродством титана некоторым элементам (О, Н, N, С).

Вывод

Структура межфазной границы практически не зависит от временных параметров стабилизирующей термообработки и определяется ее температурой. Основное влияние на фазовый и химический состав зоны диффузионного взаимодействия, формирующейся при нагреве на Ti-NiCr границе, оказывает степень легирования титанового сплава. Градиент диффузии при этом преимущественно направлен в сторону титана BT1-0 и его сплавов ОТ4 и BT20.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shmorgun V. G. et al. Microstructure and phase composition of diffusion coating formed in NiCr alloys by hot-dip aluminizing // *Surfaces and Interfaces*. – 2021. – Т. 23. – С. 100988.
2. Диффузионные процессы в биметалле титан-сплав X20H80 / В. Г. Шморгу́н, А. И. Богданов, В. П. Кулевич, М. А. Разуваев, Э. Р. Камалов // *Известия ВолгГТУ : научный журнал* № 2 (273) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 7–11.
3. Bogdanov A. et al. Kinetics of diffusion interaction in the Ti-NiCr system layered composites // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2023. – Т. 413. – С. 02023.
4. Bogdanov A. I., Kulevich V. P., Shmorgun V. G. Microstructure evolution and growth of interfacial intermetallic compounds in NiCr/Ti alloy laminated composite after explosive welding and heat treatment // *Metals*. – 2023. – Т. 13. – №. 8. – С. 1417.