

УДК 621.793

Формирование алюминидного покрытия на поверхности титана с использованием сварки взрывом, обработки давлением и термообработки

Кулевич Виталий Павлович^{1(*)}

kulevich.vp@gmail.com

Богданов Артем Игоревич^{1(*)}

bogdanov@vstu.ru

Шморгун Виктор Георгиевич¹

vgshmorgun@mail.ru

Новиков Роман Евгеньевич²

renovikov@vnikti.rosneft.ru

¹ ВГТУ, Волгоград, Россия² АО «ВНИКТИнефтехимоборудование», Волгоград, Россия

Аннотация. Представлена технология получения алюминидного покрытия на поверхности титана, включающая: сварку взрывом композиции сталь – алюминий – титан; ее обработку давлением для утонения алюминиевого слоя; отжиг для формирования на границе сталь – алюминий хрупкой диффузионной зоны, приводящей к самопроизвольному отделению стального слоя; заключительную термообработку выше температуры плавления алюминия. На каждом этапе получения алюминидного покрытия исследованы структура и фазовый состав композиции.

Ключевые слова: покрытия, сварка взрывом, обработка давлением, термообработка, фазовый состав, алюминиды титана

Formation of aluminide coating on titanium surface using explosive welding, pressure treatment and heat treatment

Kulevich Vitaly Pavlovich^{1(*)}

kulevich.vp@gmail.com

Bogdanov Artem Igorevich¹

bogdanov@vstu.ru

Shmorgun Viktor Georgievich¹

vgshmorgun@mail.ru

Novikov Roman Evgenevich²

renovikov@vnikti.rosneft.ru

¹ Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia² JSC "VNIKTIneftekhimoborudovanie", Volgograd, Russia

Abstract. The technology of obtaining an aluminide coating on the surface of titanium is presented, including: explosion welding of a steel – aluminum – titanium composition; its pressure treatment to thin the aluminum layer; annealing to form a brittle diffusion zone at the steel – aluminum boundary, leading to spontaneous separation of the steel layer; final heat treatment above the melting point of aluminum. At each stage of obtaining the aluminide coating, the structure and phase composition of the composition are studied.

Keywords: coatings, explosion welding, pressure treatment, heat treatment, phase composition, titanium aluminides

Введение. Известно, что одними из наиболее перспективных функциональных покрытий с высоким уровнем жаростойкости, жаропрочности и термической стабильности являются покрытия на основе алюминидов титана [1]. Алюминиды титана, помимо уникального комплекса свойств, присущего непосредственно титану и его сплавам, с одной стороны, имеют достаточно высокую твердость (так у соединения TiAl_3 значение этого параметра составляет $\sim 4,2\text{--}6,8$ ГПа), а с другой стороны, содержат необходимое содержание алюминия (в соединении TiAl_3 63 мас. %) для формирования на их поверхности сплошной плотной оксидной пленки Al_2O_3 , обеспечивающей эффективную защиту подложки от высокотемпературного окисления [2]. Основными способами получения алюминидных покрытий на поверхности титана являются лазерный синтез [3, 4], технологии напыления [5, 6], самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) [7], различные варианты осаждения [8–9], наплавки [10], погружения в расплав [11, 12]. В настоящей работе предложен новый метод получения интерметаллидных покрытий на основе алюминидов титана, заключающийся в сварке взрывом композиции сталь – алюминий – титан, ее обработки давлением для утонения алюминиевого слоя, отжиге трехслойного композита для формирования на границе сталь – алюминий хрупкой диффузионной зоны, приводящей к самопроизвольному отделению стального слоя, и заключительной термообработке выше температуры плавления алюминия. Целью работы является рассмотрение влияния вышеописанных операций комплексного технологического процесса на формирование структуры покрытия на основе алюминидов титана.

Материалы и методы. В качестве исходных материалов использовали листы стали марки 20880, алюминия АД1 и титана ВТ1-0 толщиной 1,6, 1,0 и 3,0 мм соответственно. Композиционную заготовку получали сваркой взрывом по одновременной плоскопараллельной схеме (рис. 1).

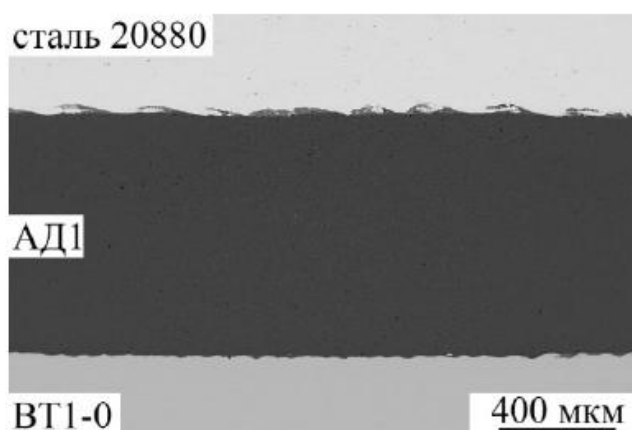


Рис. 1. СЭМ изображение структуры трехслойного образца сталь 20880 + алюминий АД1 + титан ВТ1-0 после сварки взрывом

Металлографические исследования осуществляли с применением оптической (Olympus BX-61) и электронной микроскопии (Versa 3D Dual Beam). Рентгеноспектральный анализ химического состава проводился на электрон-

ном микроскопе с помощью детектора Apollo X Silicon Drift Detector (SDD). Рентгенофазовый анализ выполняли на дифрактометре Bruker D8 ADVANCE ECO.

Результаты и их обсуждение. Металлографические исследования структуры границы соединения 20880 + АД1 после сварки (рис. 1) показали в начале пластины наличие оплавленного металла в виде тонких (~10 мкм) участков небольшой протяженности. Анализ границы соединения ВТ1-0 + АД1 показал формирование на межслойной границе локальных участков оплавленного металла толщина которых не превышала 2–3 мкм.

В результате осадки на 9 и 13 % толщина алюминиевого слоя снизилась с 825 до 495 и 410 мкм, соответственно. При этом прослойки, входящие в состав ДЗ не деформировались, а разрушались (дробились), т. к. температура деформации составляет ~50 % от температуры плавления интерметаллидов (Fe_2Al_5 , FeAl_3) и их пластические свойства значительно ниже пластичности алюминия и стали (рис. 2). Причем с увеличением степени деформации при осадке частички прослоек разделяются все большими, вновь образованными участками соединения прослойки с алюминием и сталью с новыми связями.

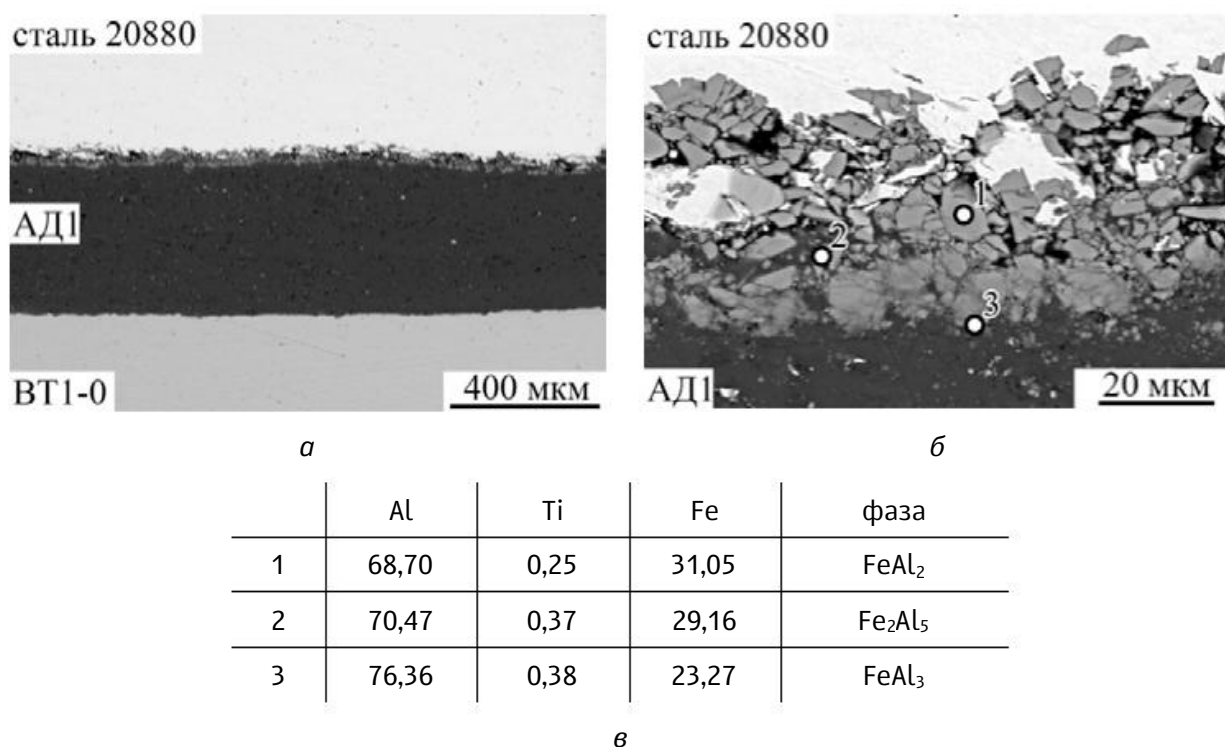


Рис. 2. СЭМ изображение структуры трехслойного образца (а) и ДЗ (б) после осадки на 13 % и результаты точечного ЭДС анализа (в)

Термообработка трехслойного композита сталь 20880 + алюминий АД1 + титан ВТ1-0 по режиму 640 °С, 1 ч в результате разрушения прослойки со стороны алюминия (фаза FeAl_3) и формирования магистральной трещины, позволила отделить стальной слой (рис. 3).

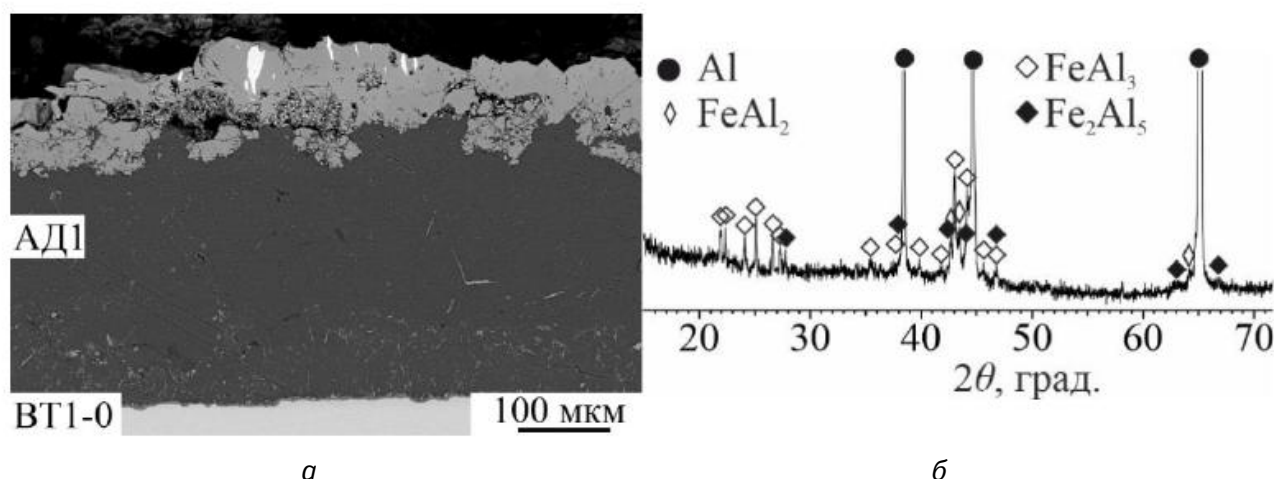


Рис. 3. СЭМ изображение алитированного слоя на поверхности титана BT1-0 с включениями интерметаллидов (а) и дифрактограмма, снятая с поверхности (б)

На рис. 4 представлено СЭМ изображение поперечного сечения алитированного слоя после четырехчасовой выдержки при 700 °С. Его анализ показывает, что на поверхности покрытия сформировалась структура на основе интерметаллида TiAl_3 , что подтверждается данными РФА (рис. 4, б). Помимо рефлексов основной фазы TiAl_3 , имеются рефлексы алюминида TiAl_2 и низкотемпературной модификации оксида алюминия $\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$, а также рефлексы «остаточного» (непрореагировавшего) алюминия. Образование алюминида TiAl_2 обусловлено фазовой трансформацией $\text{TiAl}_3 \rightarrow \text{TiAl}_2$, протекающей на границах соседних частиц TiAl_3 , в местах их плотного контакта. В срединной части покрытия и в прилегающем к титану слое (рис. 4, а) образуются светлые включения, формирование которых связано с диффузией железа из фрагментов частиц интерметаллидов, оставшихся на поверхности алитированного слоя после отделения слоя стали.

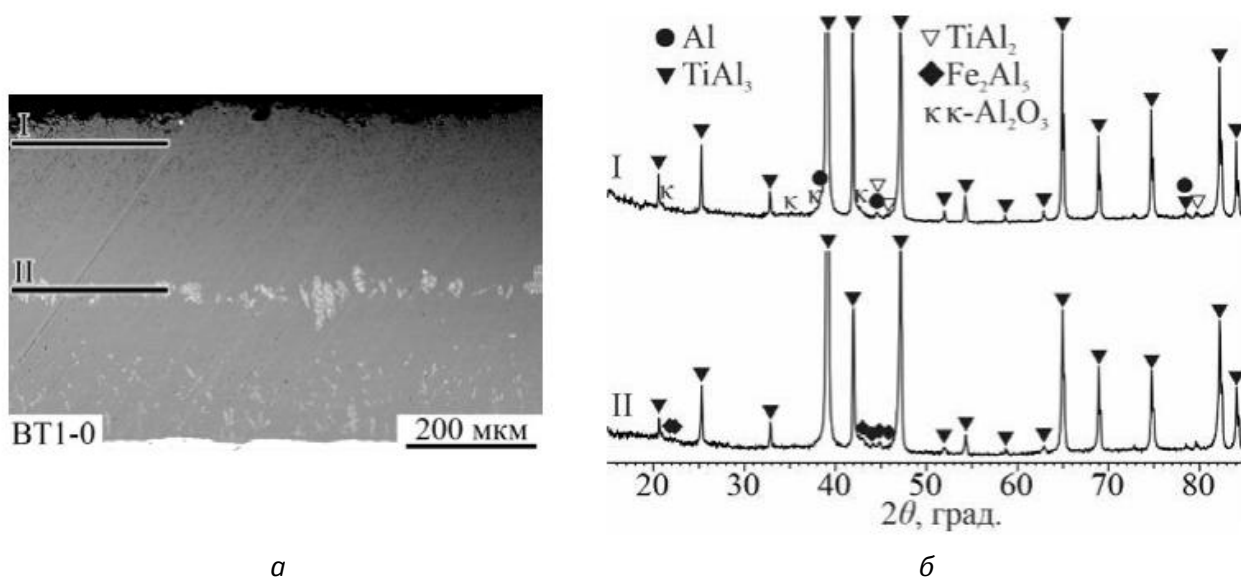


Рис. 4. СЭМ изображение алитированного слоя на поверхности титана BT1-0 после Т0 по режиму 700 °С, 4 ч (а) и дифрактограммы, снятые в сечениях I и II (б)

Заключение. Сварка взрывом на оптимальных параметрах процесса обеспечивает получение трехслойного композита титан ВТ1-0 – алюминий АД1 – сталь 20880 по одновременной плоскопараллельной схеме с прочностью соединения слоев на уровне алюминия АД1 и минимальным уровнем химической микронеоднородности. Горячая обработка давлением сваренных взрывом соединений сталь 20880 + алюминий АД1 + титан ВТ1-0 при 600 °С позволяет регулировать толщину алюминиевого слоя. Термообработка трехслойного композита после горячей обработки давлением по режиму 640 °С, 1 ч приводит к формированию магистральной трещины по прослойке интерметаллида Fe_2Al_5 и самопроизвольному отделению стального слоя от алюминиевого. Термообработка при 700 °С позволяет сформировать на поверхности титана покрытие на основе алюминиды титана TiAl_3 .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00231.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Pöttgen R., Johrendt D. Intermetallics: Synthesis, Structure, Function. Boston, Walter de Gruyter GmbH Berlin, 2014, 294 p.
- [2] Гуревич Л.М., Шморгун В.Г., Слаутин О.В., Богданов А.И. *Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия*. Москва, Металлургиздат, 2016, 346 с.
- [3] Shaik E.H., Sisa P. Heat Treatment of In Situ Laser-Fabricated Titanium Aluminide. *Freemantle and Monnamme Tlotleng. Metals*, 2018, no. 8, art. no. 655.
- [4] Malutina 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 & Coatings Technology (Surface and Coatings Technology)*, 2017, vol. 319, pp. 136–144.
- [5] Jingjie D., Jiyun Zh., Lei Zh., Shouying L. Effect of surface aluminizing on long-term high-temperature thermal stability of TC4 titanium alloy. *Surface Review and Letters*, 2016, vol. 23, no. 2, art. no. 1550102.
- [6] Sienkiewicz J., Kuroda S., Murakami H. Fabrication and oxidation resistance of TiAl matrix coatings reinforced with silicide precipitates produced by heat treatment of warm sprayed coatings. *J. Therm. Spray Tech.*, 2018, vol. 27, pp. 1165–1176.
- [7] Suzuki A., Miyake Sh., Naruse W., Takata N., Kobashi M. Synthesis of porous $\text{Al}/\text{Al}_3\text{Ti}$ composite with hierarchical openecell structure for combining with phase change material. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 770, pp. 1100–1111.
- [8] Baptista A., Silva F., Porteiro J., Míguez J., Pinto G. Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands. *Coatings*, 2018, vol. 8 (11), art. no. 402.
- [9] Pyachin S.A., Burkov A.A. Formation of intermetallic coatings by electrospray deposition of titanium and aluminum on a steel substrate. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2015, vol. 51, pp. 118–124.
- [10] Henckell P., Ali Y., Metz A., Bergmann J.P., Reimann J. In Situ Production of Titanium Aluminides during Wire Arc Additive Manufacturing with Hot-Wire Assisted GMAW Process. *Metals*, 2019, vol. 9 (5), art. no. 578.
- [11] Li X.T., Huang L.J., Wei S.L. Cycle oxidation behavior and anti-oxidation mechanism of hot-dipped aluminum coating on TiBw/Ti6Al4V composites with network microstructure. *Sci Rep.*, 2018, vol. 8, art. no. 5790.
- [12] Wang S., Zhou L., Li C., Li Z., Li H., Yang L. Micrographic Properties of Composite Coatings Prepared on TA2 Substrate by Hot-Dipping in Al-Si Alloy and Using Micro-Arc Oxidation Technologies (MAO). *Coatings*, 2020, vol. 10(4), art. no. 374.