

ВЛИЯНИЕ НИКЕЛЯ НА СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ТИТАН – АЛЮМИНИЙ

© 2019

А.И. Ковтунов, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
А.Г. Бочкарев, аспирант кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
Д.И. Плахотный, старший преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением
и родственные процессы»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)
А.А. Гуцин, инженер
ООО «Средневожский сертификационно-диагностический центр "Дельта"», Тольятти (Россия)

Ключевые слова: аргонодуговая наплавка; интерметаллидные сплавы; твердость; износостойкость; жаростойкость; алюминиды титана; легирование; никель.

Аннотация: Разработка и освоение новых конструкционных материалов на основе титана, сочетающих в себе высокие показатели жаростойкости, низкой плотности, является весьма актуальной задачей современного материаловедения. Существующие материалы на основе интерметаллидных сплавов системы Ti-Al имеют низкую пластичность при комнатных температурах, что затрудняет их практическое применение. Одним из путей повышения пластичности алюминидов титана является легирование интерметаллидного сплава. Применение компонентов, растворимых в алюминиде титана, которые находятся в непосредственной близости с алюминием и титаном в периодической таблице Д.И. Менделеева, позволит повысить пластичность интерметаллидного сплава на основе Ti-Al.

В статье представлены результаты исследования процессов аргонодуговой наплавки сплавов системы Ti-Al, легированных никелем с применением алюминиевой и никелевой присадочных проволок. Установлена зависимость между режимами наплавки и химическим составом наплавленного металла, а также определено влияние никеля на твердость, износостойкость, жаростойкость и трещиностойкость наплавленных сплавов системы Ti-Al.

Проведенные исследования показали, что легирование никелем в количестве 4,5–11,7 % (по массе) при содержании алюминия 10,4–34 % (по массе) повышает твердость и износостойкость наплавленного металла. Легирование никелем в указанных пределах при содержании алюминия до 33 % не повышает жаростойкость наплавленных сплавов в сравнении с нелегированным интерметаллидным сплавом на основе Ti-Al. При легировании никелем наплавленных сплавов с содержанием алюминия более 33 % жаростойкость наплавленного металла повышается.

Легирование никелем увеличивает вероятность образования трещин в наплавленных сплавах системы Ti-Al, что связано с образованием в структуре металла включений хрупкой фазы Ti₂Ni.

ВВЕДЕНИЕ

Титан и его сплавы являются объектом исследования ученых на протяжении многих лет, что связано с уникальным комплексом свойств титановых сплавов. Высокая прочность и пластичность делают его незаменимым в авиационно-космической, химической и нефтехимической промышленности, машиностроении, а также в приборостроении.

Предельная температура эксплуатации современных титановых сплавов составляет 500–600 °С [1–3]. Повышения температуры эксплуатации деталей и узлов из титановых сплавов можно достичь, применяя интерметаллидные сплавы системы Ti-Al, обладающие высокими показателями удельной прочности, жаростойкости и коррозионной стойкости [4–6]. Алюминиды титана могут успешно применяться в деталях и узлах, работающих при температуре до 850 °С [6–8].

Ограничения при производстве и эксплуатации алюминидов титана связаны с низкой пластичностью. При температурах, близких к комнатной, невозможна пластическая деформация, так как движение дислокаций заблокировано из-за сильно развитых ковалентных связей. В результате этого происходит скопление деформаций и зарождение микротрещин, что приводит к хрупкому разрушению интерметаллида [5]. Повышения пластичности алюминидов титана можно достичь путем легирования интерметаллидного сплава [9–11].

Литературный обзор и анализ трехфазных диаграмм состояния Ti-Al-X (X – легирующий элемент) показал, что основными легирующими элементами, повышающими механические свойства алюминидов титана, могут быть Nb, Ni, Cu, Ta, Co, Mn, V, Si, W, Mo, Be, Cr, Hf, Zr [12–14].

С учетом уникальности эксплуатационных свойств и недостатков алюминидов титана, они могут успешно применяться при формировании наплавленных слоев на титановые изделия, а для повышения пластичности покрытия при наплавке целесообразно проводить дополнительное легирование компонентами, повышающими технологическую прочность алюминидов титана [15–17].

Одним из широко распространенных легирующих элементов является никель, вследствие чего было предложено провести исследования процессов аргонодуговой наплавки интерметаллидных сплавов системы Ti-Al, легированных никелем.

Цель работы – исследование влияния никеля на свойства наплавленных сплавов системы титан – алюминий.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аргонодуговую наплавку интерметаллидных сплавов системы титан – алюминий проводили на постоянном токе прямой полярности с использованием

вольфрамового электрода (WP Ø3,2 мм). Сила тока при этом составляла $I=270$ А, напряжение на дуге было $U=15$ В. Скорость подачи присадочной проволоки изменялась в пределах от 1 до 4 м/мин. Скорость наплавки при этом оставалась постоянной (0,15 м/мин). Варьирование скоростью подачи присадочной проволоки позволяло формировать наплавленные слои с различным содержанием алюминия. Для наплавки применялась проволока – СвА8 (Ø1,2 мм).

Присадочная проволока подавалась в хвостовую часть сварочной ванны для уменьшения разбрызгивания алюминия и снижения его угара при наплавке [18].

Наплавка производилась на титановые пластины толщиной 10 мм (BT1-0). В качестве защитной среды использовали аргон высокой чистоты, расход защитного газа составлял 25–35 л/мин.

Для легирования применяли никелевую проволоку НП2 (Ø1,2 мм), которую укладывали на титановые образцы в специальные пазы, изготовленные перед наплавкой (рис. 1). Проволока укладывалась в один, два, три ряда, что позволяло изменять степень легирования никелем наплавленных сплавов.

Качество наплавленного валика определяли визуальным и измерительным контролем, оценивая при этом качество поверхности, стабильность геометрических параметров наплаваемого валика по всей длине. Измерительный контроль проводили при помощи штангенциркуля ШЦ-1, а также используя масштабный коэффициент и программу Universal Desktop Ruler. Склонность к образованию трещин определяли по наличию (количеству) трещин на определенном участке наплавки, длина участка наплавки составляла 120 мм.

Для изучения структуры и химического состава наплавленных покрытий применялся метод растровой электронной микроскопии, который основан на регистрации различных типов сигналов, генерируемых в образце при сканировании его поверхности сфокусированным электронным зондом [19].

Твердость наплавленного металла определялась по методу Роквелла (шкала HRC) в соответствии с ГОСТ 9013. Измерения проводились на твердомере HBRV-187.5.

Износостойкость наплавленных сплавов определялась способностью поверхностных слоев противостоять внедрению абразивных частиц при абразивном изнаши-

вании о закрепленные частицы и оценивалась относительной износостойкостью [19]:

$$E = \Delta l_3 / \Delta l_m,$$

где Δl_3 – линейный износ основного металла; Δl_m – линейный износ испытуемого материала.

Жаростойкость наплавленного металла оценивалась по относительному изменению массы образцов с одинаковой площадью поверхности, выдерживаемых в печи сопротивления при 800 °С. Температуру испытаний выбрали исходя из максимальной температуры эксплуатации алюминидов титана [5]. Массу образцов измеряли через каждые 50 часов выдержки после предварительного удаления продуктов высокотемпературной коррозии с поверхности образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Химический анализ наплавленных валиков показал, что среднее содержание в них химических элементов находится в следующих пределах: алюминия – от 10 до 34 %, титана – от 52 до 84 %, никеля – от 4 до 14 % (по массе). Увеличение скорости подачи присадочной проволоки приводит к увеличению содержания алюминия в наплавленном металле. Содержание никеля изменяется в зависимости от количества укладываемых проволок на титановые образцы. При использовании одной проволоки содержание никеля находилось в пределах 4–5 %, а при укладке двух проволок – от 9 до 11 % (по массе). Наплавка с тремя проволоками повысила содержание никеля до 15 % (по массе).

По результатам оптических наблюдений микроструктура наплавленных сплавов представлена однофазной структурой на основе фазы $\alpha(\text{Ti})$ и двухфазной структурой на основе фаз $\alpha(\text{Ti})+\text{Ti}_2\text{Ni}$ и $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})+\text{Ti}_2\text{Ni}$ (рис. 2) [20]. В двухфазных сплавах структура представлена матричной фазой $\alpha(\text{Ti})$ или $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ с включениями фазы Ti_2Ni (рис. 3) [20].

Твердость наплавленного металла изменяется в пределах от 28 до 57 HRC. Максимальные значения твердости наблюдаются у образцов с содержанием алюминия от 20 до 28 %, никеля – от 5 до 11 % (по массе), которые представлены двухфазной структурой на основе фазы $\alpha(\text{Ti})$ с включениями фазы Ti_2Ni (рис. 4).

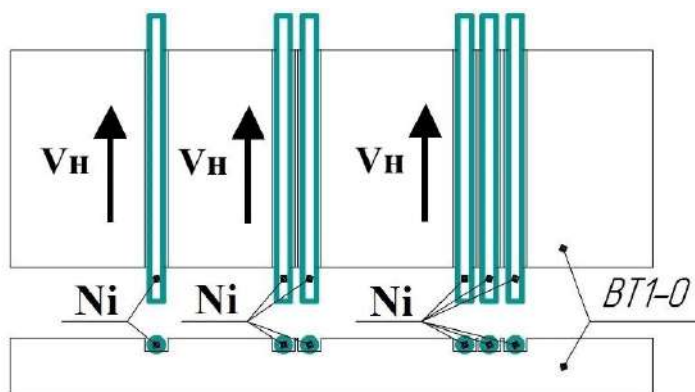


Рис. 1. Схема легирования никелем

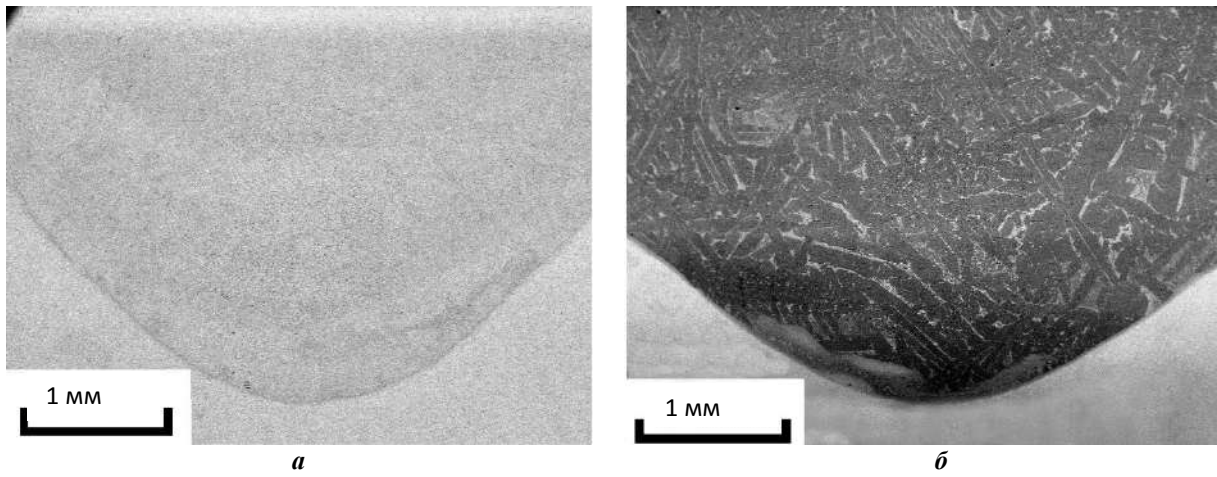


Рис. 2. Микроструктура наплавленного металла:
 а – однофазная структура на основе фазы $\alpha(\text{Ti})$;
 б – двухфазная структура на основе фазы $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})+\text{Ti}_2\text{Ni}$

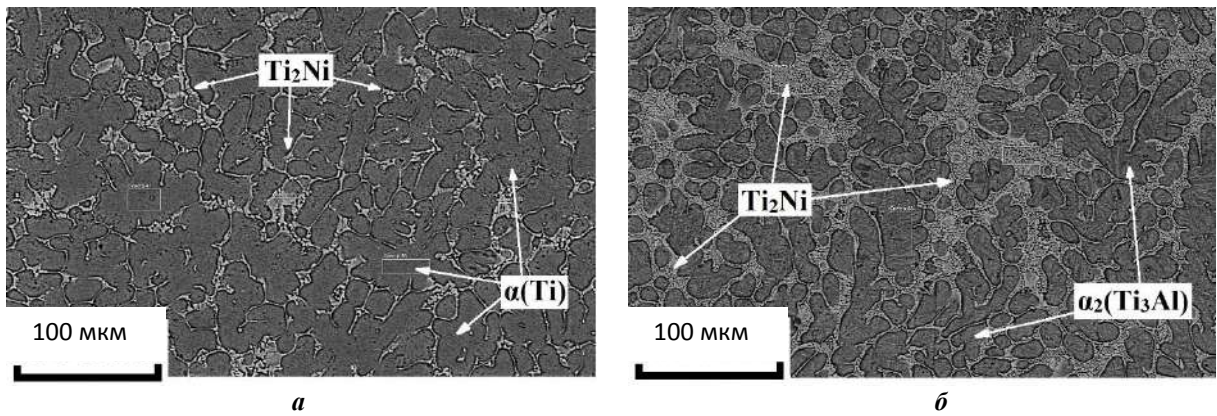


Рис. 3. Микроструктура наплавленного металла:
 а – двухфазная структура на основе фазы $\alpha(\text{Ti})+\text{Ti}_2\text{Ni}$;
 б – двухфазная структура на основе фазы $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})+\text{Ti}_2\text{Ni}$

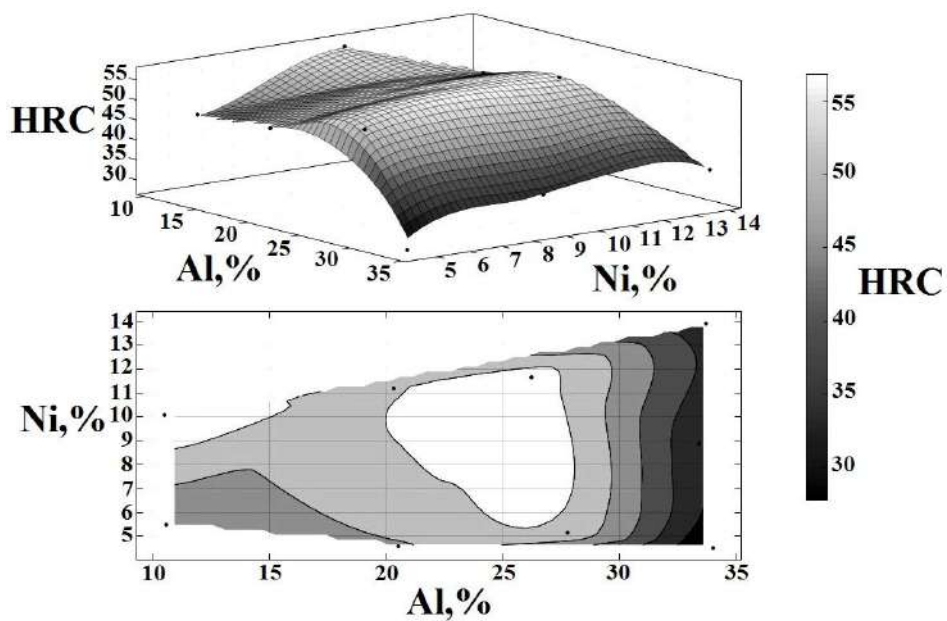


Рис. 4. График зависимости твердости наплавленного металла от содержания алюминия (Al) и никеля (Ni)

Интерметаллидные сплавы на основе Ti-Al при легировании Ni обладают высокими показателями относительной износостойкости, которая находится в пределах от 1,3 до 6 ед. Максимальные значения износостойкости наблюдаются у образцов с содержанием алюминия от 26 до 28 %, никеля – от 5 до 11 % (по массе), которые представлены двухфазной структурой на основе фазы $\alpha(\text{Ti})$ с включениями фазы Ti_2Ni (рис. 5).

Исследование жаростойкости в течение 700 часов при температуре 800 °С показало, что легирование алюминидов титана никелем не повышает жаростойкость наплавленного металла при концентрации алюминия до 33 % по сравнению с жаростойкостью нелегированных сплавов на основе Ti-Al. При увеличении содержания алюминия более чем на 33 % жаростойкость наплавленного металла легированного никелем выше, чем у нелегированных сплавов на основе Ti-Al (рис. 6).

Легирование никелем, исходя из проведенных экспериментальных исследований, повышает вероятность образования трещин наплавленных сплавов на основе интерметаллидных сплавов системы Ti-Al. При легировании интерметаллидных сплавов образуется структура на основе фаз $\alpha(\text{Ti})+\text{Ti}_2\text{Ni}$ и $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})+\text{Ti}_2\text{Ni}$. Количество трещин возрастает при появлении в структуре сплавов фазы Ti_2Ni .

ВЫВОДЫ

1. Легирование никелем в количестве 4,5–11,7 % (по массе) наплавленных интерметаллидных сплавов системы титан – алюминий при содержании алюминия 10,4–34 % (по массе) способствует повышению твердости и износостойкости наплавленных сплавов.

2. Легирование никелем не повышает жаростойкость наплавленного металла при концентрации алюминия до 33 %. При увеличении содержания алюминия более чем

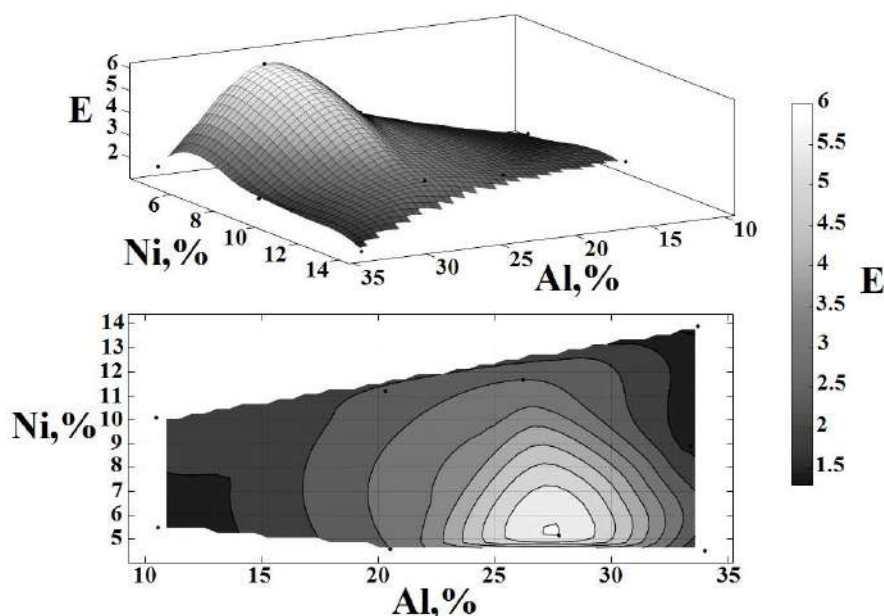


Рис. 5. График зависимости относительной износостойкости наплавленного металла от содержания алюминия (Al) и никеля (Ni)

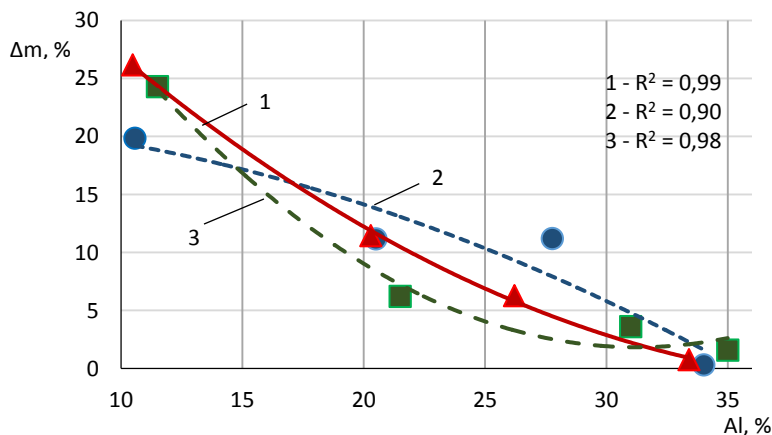


Рис. 6. Потеря массы образцов при испытаниях на жаростойкость (в течение 700 часов): 1 – Ti-Al-Ni (Ni~10 %); 2 – Ti-Al-Ni (Ni~5 %); 3 – Ti-Al

до 33 % жаростойкость наплавленного металла выше, чем у нелегированных сплавов на основе Ti-Al.

3. Легирование никелем увеличивает вероятность образования трещин в наплавленных сплавах системы Ti-Al, это связано с наличием хрупкой фазы Ti_2Ni в виде включений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках реализации проекта № 17-48-630361.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития // Труды ВИАМ. 2013. № 2. С. 4–19.
- Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 520 с.
- Анпилов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 186–194.
- Ковтунов А.И., Бочкарев А.Г., Плахотный Д.И., Гушин А.А. Влияние циркония на процессы формирования и свойства наплавленных сплавов системы Ti-Al // Сварка и диагностика. 2018. № 5. С. 47–50.
- Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: МИСИС, 2005. 432 с.
- Казанцева Н.В. Материалы для высокоскоростных транспортных систем. Екатеринбург: УрГУПС, 2016. 163 с.
- Дзунович Д.А., Алексеев Е.Б., Панин П.В., Лукина Е.А., Новак А.В. Структура и свойства листовых полуфабрикатов из деформируемых титановых сплавов разных классов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2. С. 17–25.
- Горлов Д.С., Александров Д.А., Заклякова О.В., Азаровский Е.Н. Исследование возможности защиты интерметаллидного титанового сплавов от фреттинг-износа путем нанесения ионно-плазменного покрытия // Труды ВИАМ. 2018. № 4. С. 51–58.
- Деменок А.О., Ганеев А.А., Деменок О.Б., Кулаков Б.А. Выбор легирующих элементов для сплавов на основе алюминидов титана // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2013. № 1. С. 95–102.
- Клопотов В.Д., Потехаев А.И., Клопотов А.А., Кулагина В.В., Кнестяпин Е.А., Маркова Т.Н., Морозов М.М. Тройные диаграммы на основе алюминидов титана, анализ и построение // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 2. С. 96–100.
- Муратов В.С., Морозова Е.А. Формирование структуры и свойств титана при лазерном легировании никелем и марганцем // Металловедение и термическая обработка металлов. 2018. № 9. С. 36–40.
- Ковтунов А.И., Плахотный Д.И., Гушин А.А., Плахотная С.Е., Бочкарев А.Г. Влияние режимов наплавки на структуру и свойства покрытий системы титан-алюминий // Сварка и диагностика. 2016. № 2. С. 43–45.
- Хорев А.И. Теоретические и практические основы повышения конструкционной прочности современных титановых сплавов // Технология легких сплавов. 2007. № 2. С. 144–153.
- Хорев А.И. Теория легирования и термической обработки конструкционных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов высокой и сверхвысокой прочности // Вестник машиностроения. 2010. № 7. С. 32–39.
- Хорев А.И. Теория легирования и термической обработки конструкционных β -сплавов высокой прочностью // Вестник машиностроения. 2010. № 8. С. 43–50.
- Демаков С.Л., Водолазский Ф.В. Исследование влияния температуры закалки на структуру и свойства сплавов Ti-19,6Al-12,4Nb-1,5V-0,97Zr-0,6Mo // Металловедение и термическая обработка металлов. 2018. № 5. С. 35–41.
- Ковтунов А.И. Аргонодуговая наплавка сплавами на основе системы железо-алюминий. Тольятти: ТГУ, 2014. 140 с.
- Ковтунов А.И., Бочкарев А.Г., Плахотный Д.И. Исследование процессов формирования наплавленных сплавов системы Fe-Al легированных Si // Сварочное производство. 2017. № 12. С. 3–7.
- Schuster J. C. Critical data evaluation of the aluminium-nickel-titanium system // Intermetallics. 2006. Vol 14. № 10. P. 1304–1311.
- Schuster J. C., Zhu P., Shuhong L., Franz W., Yong D. On the constitution of the ternary system Al-Ni-Ti // Intermetallics. 2005. Vol 15. № 9. P. 1257–1267.

REFERENCES

- Khorev A.I. Fundamental and applied projects on titanium alloys and perspective areas of their development. *Trudy VIAM*, 2013, no. 2, pp. 4–19.
- Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva* [Titanium alloys. Composition, structure, properties]. Moscow, VILS-MATI Publ., 2009. 520 p.
- Anpilov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. 5, pp. 186–194.
- Kovtunov A.I., Bochkarev A.G., Plakhotny D.I., Gushchin A.A. Effect of zirconium on the processes of formation and properties of overlaid system Ti-Al alloys. *Svarka i diagnostika*, 2018, no. 5, pp. 47–50.
- Kolachev B.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i splavov* [Metal science and heat treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow, MISIS Publ., 2005. 432 p.
- Kazantseva N.V. *Materialy dlya vysokoskorostnykh transportnykh sistem* [Materials for high-speed transport systems]. Ekaterinburg, UrGUPS Publ., 2016. 163 p.
- Dzunovich D.A., Alekseev E.B., Panin P.V., Lukina E.A., Novak A.V. Structure and properties of sheet semi-finished products from various wrought intermetallic titanium alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 2, pp. 17–25.
- Gorlov D.S., Aleksandrov D.A., Zaklyakova O.V., Azarovskiy E.N. Investigation of the possibility of protection of intermetallic titanium alloy against fretting wear by ion-plasma coating. *Trudy VIAM*, 2018, no. 4, pp. 51–58.

9. Demenok A.O., Ganeev A.A., Demenok O.B., Kulakov B.A. The choice of alloying elements for titanium aluminide base alloys. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*, 2013, no. 1, pp. 95–102.
10. Klopotov V.D., Potekaev A.I., Klopotov A.A., Kulagina V.V., Knestyapin E.A., Markova T.N., Morozov M.M. Triple titanium aluminide-based diagrams. Analysis and construction. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 2, pp. 96–100.
11. Muratov V.S., Morozova E.A. Formation of structure and properties of titanium under laser surface alloying with nickel and manganese. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2018, no. 9, pp. 36–40.
12. Kovtunov A.I., Plakhotny D.I., Gushchin A.A., Plakhotnaya S.E., Bochkarev A.G. Influence of surfacing modes on the structure and properties of titanium-aluminum system coatings. *Svarka i diagnostika*, 2016, no. 2, pp. 43–45.
13. Khorev A.I. Theoretical and practical bases of increase of constructional durability of modern titanium alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2007, no. 2, pp. 144–153.
14. Khorev A.I. Alloying and heat treatment of structural ($\alpha+\beta$) titanium alloys of high and superhigh strength. *Russian engineering research*, 2010, vol. 30, no. 7, pp. 682–688.
15. Khorev A.I. Alloying and heat treatment of high-strength structural titanium β -alloys. *Russian engineering research*, 2010, vol. 30, no. 8, pp. 781–788.
16. Demakov S.L., Vodolazsky F.V. A study of the effect of quenching temperature on the structure and properties of alloy Ti-19,6Al-12,4Nb-1,5V-0,97Zr-0,6Mo. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2018, no. 5, pp. 35–41.
17. Kovtunov A.I. *Argonodugovaya naplavka splavami na osnove sistemy zhelezo-alyuminiy* [Argon arc welding with alloys based on the iron-aluminum system]. Togliatti, TGU Publ., 2014. 140 p.
18. Kovtunov A.I., Bochkarev A.G., Plakhotny D.I. The formation investigation of fused alloys in the system of Fe-Al alloyed Si. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2017, no. 12, pp. 3–7.
19. Schuster J. C. Critical data evaluation of the aluminium-nickel-titanium system. *Intermetallics*, 2006, vol 14, no. 10, pp. 1304–1311.
20. Schuster J. C., Zhu P., Shuhong L., Franz W., Yong D. On the constitution of the ternary system Al-Ni-Ti. *Intermetallics*, 2005, vol 15, no. 9, pp. 1257–1267.

THE INFLUENCE OF NICKEL ON THE PROPERTIES OF THE DEPOSITED ALLOYS OF TITANIUM-ALUMINUM SYSTEM

© 2019

A.I. Kovtunov, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, professor of Chair “Welding, pressure treatment of materials and allied processes”
A.G. Bochkarev, postgraduate student of Chair “Welding, pressure treatment of materials and allied processes”
D.I. Plakhotny, senior lecturer of Chair “Welding, pressure treatment of materials and allied processes”
Togliatti State University, Togliatti (Russia)
A.A. Gushchin, engineer
LLC “Srednevolzhsky Certification and Test Center “Delta”, Togliatti (Russia)

Keywords: argon-arc surfacing; intermetallide alloys; hardness; wear resistance; heat resistance; titanium aluminides; alloying; nickel.

Abstract: The development and adoption of new titanium-based structural materials combining high heat resistance and low density are a very important task of modern materials science. The existing materials based on the intermetallide alloys of the Ti-Al system have low ductility at room temperatures, which complicates their practical application. One of the ways to increase the plasticity of titanium aluminides is the alloying of an intermetallide alloy. The use of components soluble in titanium aluminides which are in close proximity to aluminum and titanium in the D.I. Mendeleev’s periodic table will allow increasing the ductility of a Ti-Al-based intermetallide alloy.

This paper presents the results of the study of the processes of the argon-arc surfacing of alloys of the Ti-Al system alloyed with nickel using aluminum and nickel filler wires. The authors found out the relationship between the deposition modes and the chemical composition of the deposited metal, as well as determined the effect of nickel on the hardness, wear resistance, heat resistance and crack resistance of the deposited alloys of the Ti-Al system.

The studies showed that alloying with nickel in the amount of 4.5–11.7 % (by weight) with the aluminum content of 10.4–34 % (by weight) increased the hardness and wear resistance of metal deposit. The alloying with nickel within the specified limits with the aluminum content of up to 33 % does not increase the heat resistance of the deposited alloys in comparison with the non-alloyed intermetallide Ti-Al-based alloy. When alloying the deposited alloys with the aluminum content of more than 33 % with nickel the heat resistance of the metal deposit increases.

The alloying with nickel increases the probability of crack formation in the deposited alloys of the Ti-Al system, which is associated with the formation of the Ti_2Ni fragile phase inclusions in the metal structure.