

Исследование структуры и свойств наплавленных покрытий на основе никелида титана

А. И. Ковтунов, Д. И. Плахотный, Т. В. Семистенова,
А. Г. Бочкарев, Р. А. Бирюков, Л. В. Вершинин

Исследованы условия формирования покрытий на основе никелида титана при аргоновой двухдуговой наплавке титановой и никелевой электродных проволок на титановые образцы. Сделана оценка качества формирования и геометрических параметров шва при двухдуговой наплавке. Установлена зависимость между соотношением скоростей подачи никелевой и титановой проволок и химическим составом наплавленных покрытий. Исследованы структуры наплавленного металла в заданном диапазоне режимов наплавки. Показано, что при аргоновой двухдуговой наплавке при установленном соотношении скоростей подачи титановой и никелевой проволок формируются покрытия на основе интерметаллидных фаз Ti_2Ni и $TiNi$. Определены механические и эксплуатационные свойства наплавленных покрытий: твердость, стойкость к абразивному изнашиванию и жаростойкость при 800 °С. Установлено, что показатели относительной износостойкости наплавленных покрытий выше, чем у образцов из титана. Показана зависимость относительной износостойкости покрытий от химического и фазового состава. Получена зависимость показателей жаростойкости наплавленных покрытий от режимов наплавки и химического состава металла шва.

Ключевые слова: никелид титана, двухдуговая наплавка, твердость, износостойкость, жаростойкость.

DOI: 10.30791/1028-978X-2021-4-81-88

Введение

Сплавы на основе интерметаллидного соединения $TiNi$ обладают уникальным комплексом специальных свойств, что делает перспективным их применение как в машиностроении, так и в современной медицине [1 – 4].

Благодаря биосовместимости и механическому поведению близкому к поведению биологических тканей, никелид титана можно применять для изготовления имплантатов [5, 6].

Эффект памяти формы, которым характеризуется никелид титана, позволяет использовать его для изготовления деталей устройств и механизмов, функционирующих в температурно-силовых и деформационных режимах [1], а жаростойкость — в высокотемпературных режимах.

Потребность в изделиях из никелида титана, особенно для медицинских нужд, в последние годы

все возрастает, необходимы более совершенные технологии получения и обработки таких сплавов.

Существует и реализуется множество технологий получения интерметаллидных сплавов, в том числе и никелида титана, например, выплавка в дуговых и индукционных печах, электролиз расплавленных сред, спекание, самораспространяющийся высокотемпературный синтез [7 – 9].

Однако перечисленные технологии отличаются высокой энергоемкостью процессов и значительной стоимостью.

Для получения сплавов на основе никелида титана была предложена технология двухдуговой наплавки в аргоне с применением электродных проволок из титана и никеля. Таким способом можно формировать как изделия необходимой формы, так и наносить покрытия на поверхность уже готовых изделий. Преимуществами предлагаемого способа являются возможность получения сплавов

с заданным составом и удешевление производства сплавов за счет применения более простой технологии.

Цель работы — исследование структуры и свойств наплавленных покрытий на основе никелида титана при двухдуговой наплавке в среде аргона.

Методика проведения исследований

Исследования проводили при наплавке никелевой и титановой проволоки на листы из титана марки ВТ1-0 толщиной 10 мм.

Наплавку выполняли двумя дугами от независимых источников тока, возбуждаемыми между электродными проволоками и образцом в автоматическом режиме на специально разработанной и сконструированной установке [10]. В качестве источников сварочного тока применяли аппараты Кемпрат 323R фирмы КЕМРР, Финляндия.

В качестве наплавочных материалов использовали электродные проволоки марок НП-2 и ВТ1-0, диаметром 1,2 мм. Для защиты расплавленного металла применяли аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-2016.

Режимы наплавки устанавливали в следующих диапазонах: напряжение — $U = 16 - 17$ В, скорость сварки — $V_{св} = 0,18$ м/мин, расход аргона — 10 – 12 л/мин, скорость подачи титановой проволоки — $V_{п.п. Ti} = 3,5 - 4,5$ м/мин, скорость подачи никелевой проволоки — $V_{п.п. Ni} = 1,5 - 4$ м/мин.

Качество формирования наплавленных валиков, наличие трещин на них и других поверхностных дефектов оценивали методом визуально-измерительного контроля с применением лупы, измерительных инструментов и шаблонов.

Исследование химического состава и микроструктуры наплавленного металла проводили методами растровой электронной микроскопии на комплексе сканирующего электронного микроскопа LEO 1455 VP (ZEISS, Германия) с блоками рентгеновского энергетического спектрометра INCA Energy-300 и рентгеновского волнового спектрометра INCA Wave-500.

Рентгенофазовый анализ осуществляли на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance Eco (Bruker AXS GmbH) с вертикальным θ - θ гониометром.

Твердость измеряли с помощью стационарного универсального твердомера HBRV-187.5 по шкале HRC, микротвердость фаз — микротвердомером PMT-3M.

Износостойкость наплавленного покрытия определяли способностью его поверхностных сло-

ев противостоять внедрению абразивных частиц при абразивном изнашивании о закрепленные частицы и оценивали относительной износостойкостью:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_{st}}{\Delta l_m},$$

где Δl_{st} — линейный износ эталона (сталь 45); Δl_m — линейный износ материала.

Для сравнения испытания также проводили для образца из титана ВТ1-0.

Жаростойкость наплавленного металла оценивали путем выдержки образцов с одинаковой площадью поверхности при 800 °С в печи сопротивления. Образцы размером с одинаковой площадью поверхности вырезали из наплавленных валиков. Жаростойкость оценивали по относительному изменению массы образцов. Испытания проводили в течение 300, 400, 500 и 800 ч.

Результаты исследований и их обсуждение

При наплавке сплава системы Ti – Ni на поверхность титана в указанном диапазоне режимов формируются гладкие валики без видимых дефектов, шириной 12 – 14 мм, с высотой выпуклости 2,5 – 4,6 мм и глубиной проплавления 1,5 – 3,1 мм. Коэффициент формы шва составляет 2 – 3.

На образце, наплавленном со скоростями подачи $V_{п.п. Ti} = 3,5$ м/мин, $V_{п.п. Ni} = 3,5$ м/мин, обнаруживаются микротрещины, что вероятно связано образованием значительного объема хрупких интерметаллидных фаз.

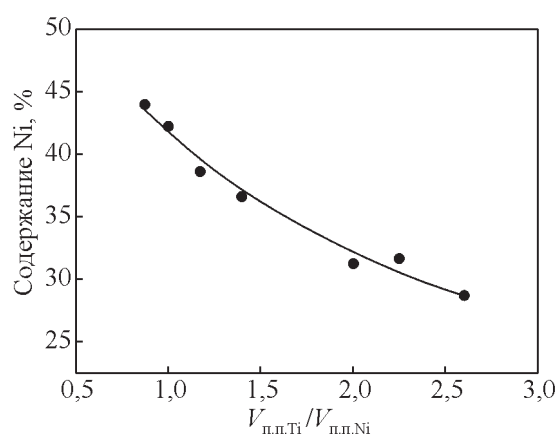
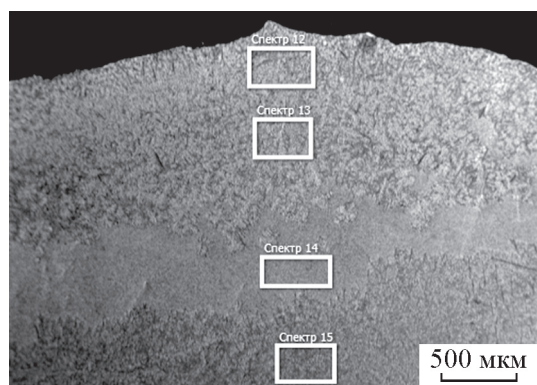


Рис. 1. Зависимость среднего содержания никеля в наплавленном металле от соотношения скоростей подачи титановой и никелевой проволоки.

Fig. 1. Dependence of average nickel value in surfacing layer on nickel and titanium wire feed speed ratio relationship.

Микрорентгеноспектральный анализ показал, что металл шва содержит в среднем от 28,6 до 44 масс. % никеля, в зависимости от соотношения скоростей подачи титановой и никелевой проволоки (рис. 1).

При этом наблюдается неравномерное распределение никеля по сечению наплавленного валика. Наибольшая сегрегация никеля зафиксирована при режимах: $V_{\text{п.п. Ti}} = 4$ м/мин, $V_{\text{п.п. Ni}} = 2$ м/мин, и



Спектр	Содержание элементов, масс. %	
	Ti	Ni
12	70,15	29,85
13	70,82	29,18
14	67,38	32,62
15	67,38	32,62

Рис. 2. Поперечное сечение наплавленного валика при скоростях подачи присадочной проволоки: $V_{\text{п.п. Ti}} = 4$ м/мин, $V_{\text{п.п. Ni}} = 2$ м/мин. В таблице приведен химический состав металла в верхних слоях.

Fig. 2. Cross-section of the deposited bead at filler wire feed rates: $V_{\text{Ti}} = 4$ m/min, $V_{\text{Ni}} = 2$ m/min. The table shows the chemical composition of the metal in the upper layers.

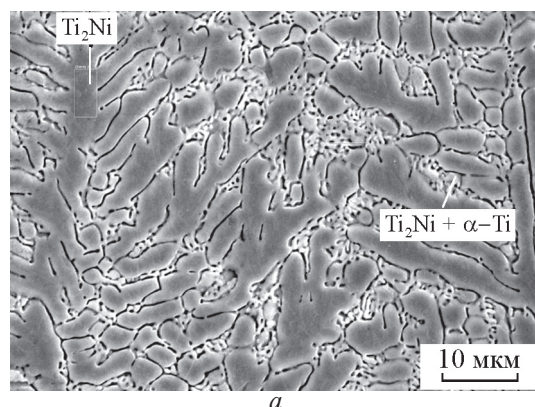


Рис. 4. Микроструктура металла швов, наплавленных при скоростях подачи титановой и никелевой проволоки, соответственно: *a* — 4,0 и 2,0 м/мин, *b* — 3,5 и 2,5 м/мин.

Fig. 4. Microstructure of surfaced bead under titanium and nickel wire feed speeds: *a* — 4.0 and 2.0 m/min, *b* — 3.5 and 2.5 m/min.

$V_{\text{п.п. Ti}} = 3,5$ м/мин, $V_{\text{п.п. Ni}} = 3$ м/мин. Разница в содержании составляет до 6 – 7 %, при этом большее количество никеля наблюдается в нижней части шва (рис. 2), что связано с более высокой плотностью никеля относительно титана.

Металл шва при скоростях подачи никелевой и титановой проволоки 1,5 и 4,0 м/мин (соотношение $V_{\text{п.п. Ti}}/V_{\text{п.п. Ni}} = 2,6$) содержит 28,6 масс. % Ni, и имеет структуру, представленную пересыщенным твердым раствором Ni в α -Ti (Ni до 13 масс. %) и эвтектикой (Ti + Ti_2Ni) с содержанием Ni около 32 масс. % (рис. 3) [11].

Высокая степень пересыщения α -Ti никелем объясняется высокой скоростью охлаждения расплавленного металла при наплавке. Этим же объясняется и более высокая концентрация никеля в эвтектике по сравнению со справочными данными [11].

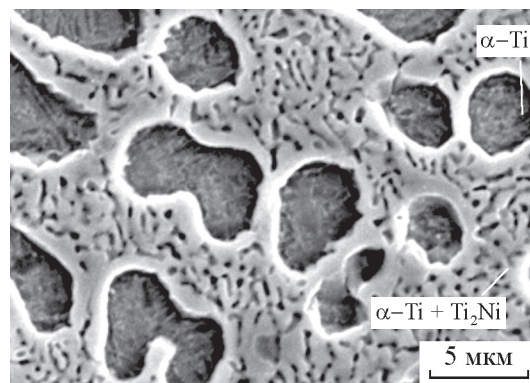
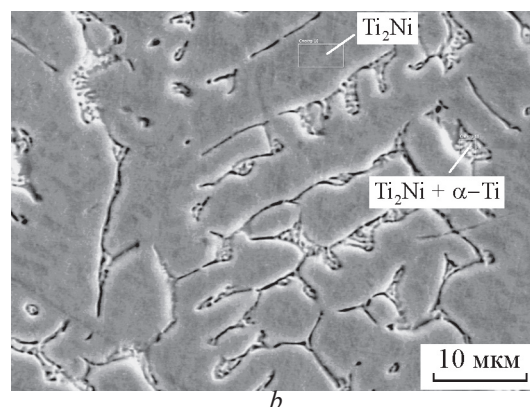
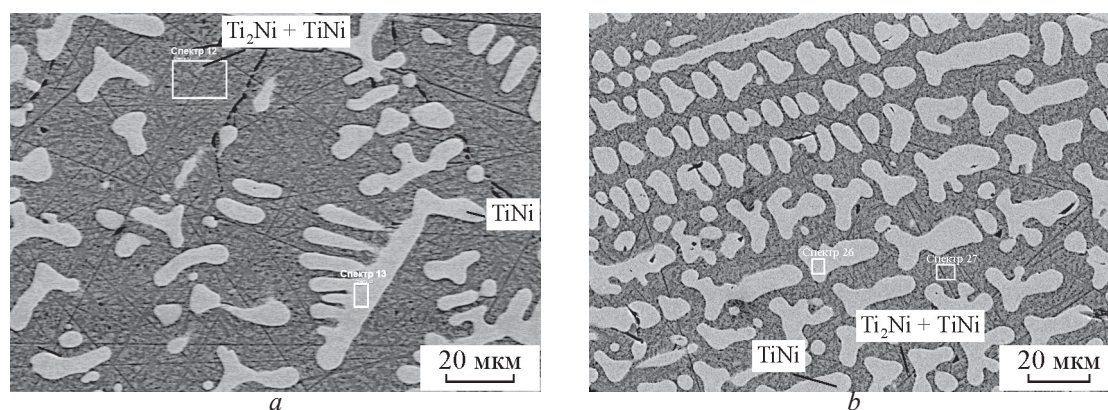


Рис. 3. Микроструктура металла шва, наплавленного при скоростях подачи титановой и никелевой проволоки 4,0 и 1,5 м/мин.

Fig. 3. Microstructure of surfaced bead under titanium and nickel wire feed speeds 4.0 and 1.5 m/min.





Спектр	Содержание, масс. %	
	Ti	Ni
12	62,06	37,94
13	46,29	53,71

Спектр	Содержание, масс. %	
	Ti	Ni
26	46,49	53,51
27	62,17	37,58

Рис. 5. Микроструктура металла шва, наплавленного при скоростях подачи никелевой проволоки, м/мин: а — 3,5, б — 4,0. Скорость подачи титановой проволоки 3,5 м/мин

Fig. 5. Microstructure of surfaced bead under nickel wire feed speeds, m/min: a — 3.5, b — 4.0, while titanium wire feed speed 3.5 m/min.

С увеличением скорости подачи никелевой проволоки до 2 м/мин (при $V_{п.п. Ti} = 4$ м/мин) содержание никеля в металле шва возрастает и в структуре образуются области, содержащие до 36 – 37 масс. % никеля, что согласно диаграмме состояния соответствует области существования фазы Ti_2Ni [11] (рис. 4). Содержание никеля в эвтектике также остается на уровне 32 – 33 масс. %.

По результатам РФА было подтверждено наличие в структуре наплавленного металла двух фаз: $\alpha-Ti$ и Ti_2Ni .

Повышение содержания никеля при режимах наплавки $V_{п.п. Ti} = 3,5$ м/мин, $V_{п.п. Ni} = 2,5$ м/мин приводит к увеличению объема фазы Ti_2Ni и уменьшению доли эвтектики (рис. 4b).

При более высоком содержании никеля, до 38,6 масс. %, которое наблюдается при скоростях подачи никелевой проволоки 3,0 м/мин, а титановой — 3,5 м/мин (соотношение скоростей подачи 1,17), в структуре появляется фаза, содержащая до 53 % Ni, что по диаграмме состояния сплава Ti – Ni соответствует области существования интерметаллического соединения $TiNi$. Образование интерметаллида $TiNi$ подтверждается также рентгенофазным анализом. Значение микротвердости данной фазы составляет 500 HV.

При увеличении скоростей подачи никелевой проволоки до 3,5 – 4 м/мин при скорости подачи титановой проволоки 3,5 м/мин (соотношение $V_{п.п. Ti}/V_{п.п. Ni} = 1$ и 0,9 соответственно) среднее со-

держание никеля возрастает до 42 – 44 %. В структуре металла шва также отмечается присутствие фаз с содержанием никеля до 53 – 54 %, предположительно являющихся интерметаллическим соединением $TiNi$ (рис. 5a, 5b).

Твердость наплавленных образцов находится в пределах 35 – 55 HRC (рис. 6). Максимальная твердость наблюдается у образцов с содержанием 36 – 38 масс. % никеля, в структуре которых отмечается преобладание интерметаллических соединений. При этом происходит заметное снижение

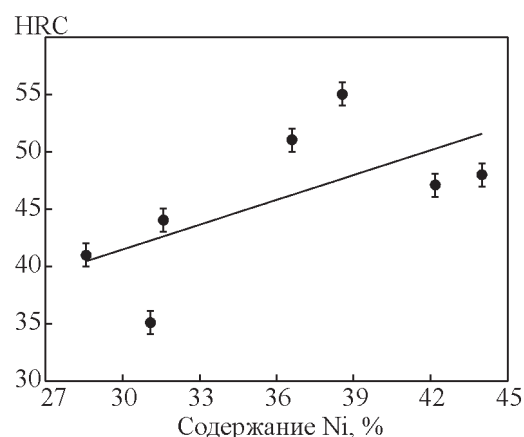


Рис. 6. Зависимость твердости наплавленных покрытий от содержания никеля в металле шва.

Fig. 6. Dependence of surfaced coatings hardness on nickel value.

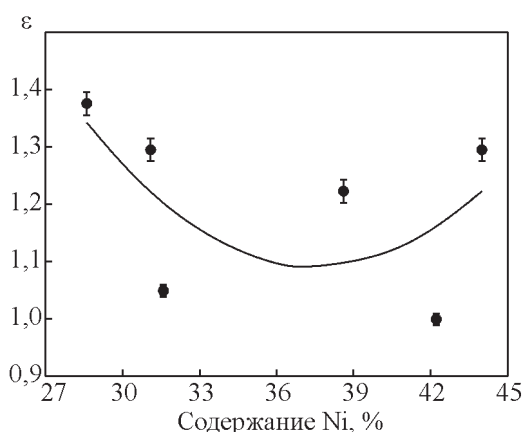


Рис. 7. Зависимость показателя относительной износостойкости ε наплавленного металла от среднего содержания никеля.

Fig. 7. Relative wear resistance and average nickel value relationship.

твердости при снижении содержания никеля с 36,3 до 31,1 %. Это вероятно вызвано резким уменьшением объема интерметаллидной фазы Ti_2Ni в металле шва.

Испытания стойкости к абразивному изнашиванию показали, что образцы наплавленных покрытий имеют более высокие показатели относительной износостойкости, чем образцы из титана ВТ1-0. Значение ε у наплавленных образцов выше в 1,1 – 1,5 раза, чем у титана, показатель износостойкости которого составил 0,9.

Значение относительной износостойкости ε зависит от содержания никеля и фазового состава наплавленного металла. Наиболее низкие значения износостойкости наблюдаются при среднем содержании никеля 32 – 42 масс. % (рис. 7). Кроме того, образцы, изготовленные из наплавленных покрытий со средним содержанием никеля до 36 масс. %, (рис. 4b) в процессе испытаний разрушаются, что указывает на их значительную хрупкость. Вероятно, более низкая стойкость к износу и разрушение при испытаниях образцов, связаны с тем, что в структуре покрытия при таком количестве никеля преобладает интерметаллидная фаза Ti_2Ni , которой свойственна высокая хрупкость.

Выдержка образцов наплавленных покрытий при 800 °C показала, что относительное изменение их массы при длительности испытаний: 300 – 400 ч может составлять 1 – 19 %, 500 ч — 10 – 24 %, 800 ч — 10 – 44 %, в зависимости от соотношения скоростей подачи проволок при наплавке и содержания никеля в наплавленном металле (рис. 8). Наименьшее изменение массы и, следовательно, максимальная жаростойкость наблюдается у образцов со средним содержанием никеля до 42 – 44 масс. %, наплавленных при скорости подачи никелевой проволоки 3,5 – 4,0 м/мин, и титановой — 3,5 м/мин. Относительное изменение массы при времени испытаний 500 ч составляет 10 – 12 %, и несущественно изменяется, до 10 – 17 %, с увеличением времени выдержки до 800 ч (рис. 8). Более высокие показатели жаростойкости у данных образцов можно объяснить их

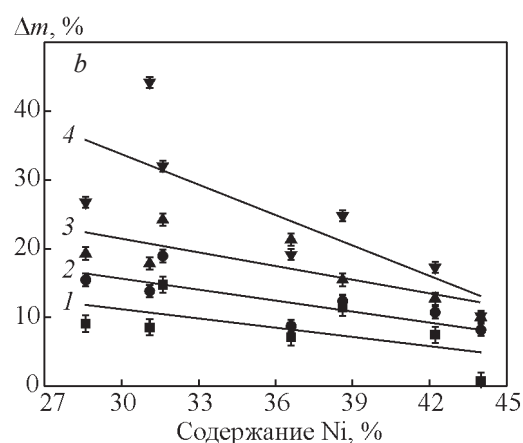
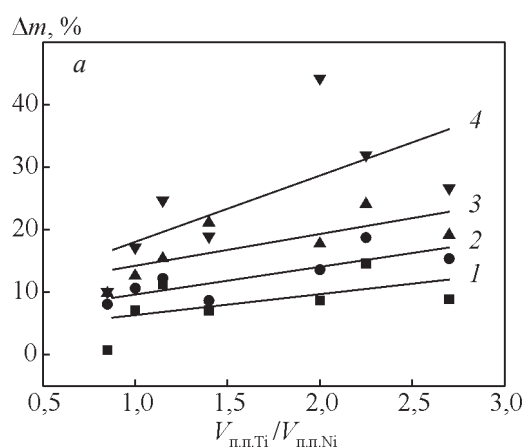


Рис. 8. Зависимость изменения массы образцов от: *a* — соотношения скоростей подачи титановой и никелевой проволок, *b* — среднего содержания никеля, при испытаниях на жаростойкость при 800 °C 300 ч (1), 400 ч (2), 500 ч (3), 800 ч (4).

Fig. 8. Dependence of samples mass change on: *a* — nickel and titanium wire feed speed ratio, *b* — average nickel value, during heat resistance tests at 800 °C, 300 (1), 400 (2), 500 (3), 800 h (4).

фазовым составом, который представлен интерметаллическими соединениями Ti_2Ni и $TiNi$ (рис. 5).

Выводы

Двухдуговая наплавка никелевой и титановой проволоками позволяет сформировать на поверхности титанового образца поверхностный слой, содержащий от 28,6 до 44,0 масс. % никеля в зависимости от соотношения скоростей подачи проволок.

При скоростях подачи никелевой проволоки 1,5 – 2,0 м/мин, а титановой — 4,0 м/мин структура металла наплавленных покрытий представлена эвтектикой $Ti-Ti_2Ni$ и интерметаллидными фазами Ti_2Ni . С повышением скорости подачи никелевой проволоки до 3,5 – 4 м/мин и снижении скорости подачи титановой проволоки до 3,5 м/мин в металле шва выявляется интерметаллидная фаза $TiNi$.

Стойкость к абразивному изнашиванию наплавленных образцов выше в 1,1 – 1,5 раза, чем у титана. При этом относительная износостойкость наплавленного покрытия определяется содержанием в его составе никеля. При 32 – 42 масс. % никеля отмечается снижение относительной износостойкости, что связано с преобладанием в структуре покрытия хрупкой интерметаллидной фазы Ti_2Ni .

Показано, что максимальной жаростойкостью при 800 °С в течение 300 – 800 ч обладают покрытия, наплавленные при скорости подачи никелевой проволоки — 3,5 – 4,0 м/мин, титановой — 3,5 м/мин, со средним содержанием никеля до 42 – 44 масс. %, металл шва которых состоит из интерметаллидных фаз Ti_2Ni , $TiNi$. Потеря массы образцов при времени выдержки 800 ч составляет не более 10 – 17 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90097.

Литература

1. Хусаинов М.А. Фазовые переходы в сплавах никелида титана с эффектом памяти формы. Вестник новгородского государственного университета, 2015, № 3(86), ч. 2, с. 81 – 84.
2. Солдатова М.И., Ходоренко В.Н., Гюнтер В.Э. Физико-механические и прочностные свойства сплавов на основе никелида титана. Известия Томского политехнического университета, 2013, т. 322, № 2, с. 135 – 139.
3. Эффект памяти формы в сплавах. Под ред. В.А. Займовского. М.: Металлургия, 1979, 472 с.

4. Хачин В.Н., Пушин В.Г., Кондратьев В.В. Никелид титана: структура и свойства. М.: Наука, 1992, 161 с.
5. Лотков А.И., Хачин В.Н., Гришков В.Н., Мейснер Л.Л., Сивоха В.П. Сплавы с памятью формы. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995, т. 2, с. 202 – 213.
6. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. Progress in materials science, 2005, v. 50, no. 5, pp. 511 – 678.
7. Браун, А., Вестбрук Дж. Методы получения интерметаллидов/Интерметаллические соединения. М.: Металлургия, 1970, с. 197 – 232.
8. Корнилов И.И., Белоусов О.К., Качур В.В. Никелид титана и другие сплавы с эффектом “памяти”. М.: Наука, 1975, 178 с.
9. Итин В.И., Найборошенко Ю.С. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений. Томск: Изд-во ТГУ, 1989, 214 с.
10. Ковтунов А.И., Плахотный Д.И., Бочкарев А.Г. Технология наплавки постоянных кокильных покрытий. Литейщик России, 2015, № 4, с. 26 – 28.
11. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: В 3-х т.: т. 3. кн. 1. Под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 2001, 872 с.

References

1. Khusainov M.A. Fazovye perekhody v splavakh nikelida titana s efektom pamyati formy [Phase transitions in titanium nickelide alloys with shape memory effect]. Vestnik of NovSU — Vestnik of Yaroslav the Wise Novgorod State University, 2015, no. 3 (86), part 2, pp. 81 – 84.
2. Soldatova M.I., Khodorenko V.N., Gunter V.E. Fizicheskomechanicheskiye i prochnostnyye svoystva splavov na osnove nikelida titana [Physico-mechanical and strength properties of alloys based on titanium nickelide]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013, vol. 322, no. 2, pp. 135 – 139.
3. Effekt pamyati formy v splavakh [Shape Memory Effect in Alloys]. Ed. V.A. Zaymovskii. M.: Metallurgiya, 1979, 472 s.
4. Khachin W.N., Pushin V.G., Kondrat'ev V.V. Nikelid titana: struktura i svoystva [Titanium nickelide: Structure and properties]. Moscow, Nauka publ., 1992, 161 p.
5. Lotkov A.I., Khachin V.N., Grishkov V.N., Meisner L.L., Sivokha V.P. Splavy s pamyat'yu formy. Fizicheskaya mezomekhanika i komp'yuternoye konstruirovaniye materialov [Shape memory alloys. Physical mesomechanics and computer-aided design of materials]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1995, vol. 2, 320 p., pp. 202 – 213.
6. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys Progress in materials science, 2005, vol. 50, no. 5, pp. 511 – 678.

7. Brown A., Westbrook J. *Metody polucheniya intermetallidov/ Intermetallicheskiye soyedineniya* [Intermetallic obtaining methods/ Intermetallic compounds]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970, pp. 197 – 232.
8. Kornilov I.I., Belousov O.K., Kachur V.V. *Nikelid titana i drugiye splavy s effektivom "pamyati"* [Titanium nickelide and other alloys with the effect of "memory"]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 178 p.
9. Itin V.I., Nayborodenko Yu.S. *Vysokotemperaturnyy sintez intermetallicheskikh soyedineniy* [High temperature synthesis of intermetallic compounds]. Tomsk, TSU Publ., 1989, 214 p.
10. Kovtunov A.I., Plahotny D.I., Bochkarev A.G. *Tekhnologiya naplavki postoyannykh kokil'nykh pokrytiy* [The technology of surfacing permanent chill coatings]. Liteyshchik Rossii Publ., 2015, no. 4, pp. 26 – 28.
11. Lyakishev N.P. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskikh sistem* [Diagrams of the state of binary metal systems]. Vol. 3, book 1, Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2001, 872 p.

Статья поступила в редакцию — 28.02.2020 г.
после доработки — 24.12.2020 г.
принята к публикации — 25.12.2020 г.

Ковтунов Александр Иванович — ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» (445020, Тольятти, ул. Белорусская, 14), доктор технических наук, профессор кафедры, специалист в области металлургических процессов сварки и наплавки.

Плахотный Денис Иванович — ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» (445020, Тольятти, ул. Белорусская, 14), старший преподаватель, специалист в области наплавки покрытий на основе интерметаллидных сплавов.

Семистенова Татьяна Владимировна — ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» (445020, Тольятти, ул. Белорусская, 14), кандидат технических наук, доцент, специалист в области наплавки покрытий на основе интерметаллидных сплавов. E-mail: tatyana_717@mail.ru.

Бочкарев Александр Геннадьевич — ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» (445020, Тольятти, ул. Белорусская, 14), аспирант, специализируется в области наплавки интерметаллидных покрытий.

Бирюков Рустям Асатович — ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» (445020, Тольятти, ул. Белорусская, 14), инженер, специалист в области наплавки.

Вершинин Леонид Владиславович — ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет» (445020, Тольятти, ул. Белорусская, 14), студент.

Investigation of structure and properties of surfaced coatings based on titanium nickelide

A. I. Kovtunov, D. I. Plahotny, T. V. Semistenova, A. G. Bochkarev,
R. A. Biryukov, L. V. Vershinin

The conditions for formation of coatings based on titanium nickelide under the argon double-arc surfacing of titanium and nickel electrode wires on the titanium samples were shown. Results of evaluating the quality of formation and geometric parameters of the weld at the double-arc surfacing were presented. Relationship between the ratio of feed rates of nickel and titanium wires and chemical composition of the deposited coatings has been established. Investigations of the structure of the surfaced metal at the surfacing modes was carried out. It has been shown that argon double-arc surfacing formed coatings based on the Ti_2Ni and $TiNi$. Mechanical and operational properties of surfaced coatings were studied — hardness, resistance to abrasion and heat resistance at 800 °C. Relative wear resistance of surfaced coatings is higher than that of titanium samples. Dependence of the relative wear resistance of the coatings on the chemical and phase composition was shown. Dependence of heat resistance of the surfaced coatings on the modes of surfacing and the chemical composition of the weld metal is established.

Keywords: titanium nickelide, double-arc surfacing, hardness, wear resistance, heat resistance.

Kovtunov Aleksandr — *Togliatti State University, (445020, Togliatti, Belorusskaya St., 14), Dr Sci (Eng), professor; specialist in the field of metallurgical welding and surfacing processes.*

Plahotnyy Denis — *Togliatti State University, (445020, Togliatti, Belorusskaya St., 14), senior lecturer; specialist in the field of surfacing coatings based on intermetallic alloys.*

Semistenova Tatiana — *Togliatti State University, (445020, Togliatti, Belorusskaya St., 14), PhD (Eng), associate professor; specialist in the field of surfacing coatings based on intermetallic alloys. E-mail: tatyana_717@mail.ru.*

Bochkarev Aleksandr — *Togliatti State University, (445020, Togliatti, Belorusskaya St., 14), specialist in the field of intermetallic coatings surfacing.*

Biryukov Rustyam — *Togliatti State University, (445020, Togliatti, Belorusskaya St., 14), engineer; specialist in the field of surfacing.*

Vershinin Leonid — *Togliatti State University, (445020, Togliatti, Belorusskaya St., 14), student.*