

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА НИКЕЛЯ ДЛЯ ДИФФУЗИОННОГО СОЕДИНЕНИЯ ТИТАНА С НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛЬЮ

А.В. Люшинский

АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро».
140103, г. Раменское, РФ, ул. Гурьева, 2. E-mail: nilsvarka@yandex.ru

Рассмотрены особенности соединения титанового сплава ПТ-3В со сталью 08X18N10T диффузионной сваркой с применением промежуточного слоя из ультрадисперсного порошка никеля, получаемого термическим разложением формиата никеля $\text{Ni}(\text{COOH})_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. Проведено сравнение структур сварных соединений данных материалов на наличие интерметаллидных фаз при сварке без промежуточных слоев и с никелевым промежуточным слоем при различных параметрах режима. Применение ультрадисперсного порошка никеля при температурах 965 и 890 °С приводит к образованию сплошного слоя твердых интерметаллидов. При температуре 790 °С диффузионная зона имеет многослойную структуру, отличающуюся от микроструктуры соединения сталь–титан, полученного без промежуточного никелевого слоя. Механические испытания сварных соединений на разрыв показали, что достаточные прочностные свойства достигаются при использовании промежуточного слоя из ультрадисперсного порошка никеля при пониженных температуре и давлении, исключающих интенсивный рост интерметаллидов. Наибольшие значения предела прочности достигнуты при температуре сварки 760...790 °С и составили в среднем 346 МПа. Библиогр. 13, табл. 3, рис. 4.

Ключевые слова: диффузионная сварка, промежуточный слой, ультрадисперсный порошок

В промышленности всегда актуальна задача соединения деталей и сборочных единиц, изготовленных из разнородных материалов, в работоспособные узлы, например, сочетания « α -титановый сплав + нержавеющая сталь 08X18N10T», методом диффузионной сварки. Известно [1–4], что соединение титановых сплавов со сплавами, содержащими никель, вызывает определенные трудности [5–7], вызванные образованием интерметаллидов между этими двумя элементами [8]. Понятно, что для получения требуемых эксплуатационных характеристик сварных соединений диффузионную сварку необходимо вести в условиях, ограничивающих образование интерметаллидных фаз в диффузионной зоне сварных швов. Другими словами, процесс сварки должен реализовываться при температурах ниже температур начала образования интерметаллидов [9–11]. Естественно, возникает необходимость применения промежуточных слоев, причем не только для исключения образования в зоне соединения интерметаллидов, но и для снижения температуры сварки и сварочного давления, тем самым, не стимулируя их рост. Решить такую неоднозначную задачу возможно с применением промежуточных слоев в виде высокоактивных энергонасыщенных порошковых материалов, обеспечивающих:

- значительное снижение термомеханического воздействия на свариваемые материалы;
- интенсификацию протекания диффузионных процессов при резко пониженных температурах;

– сохранение исходных свойств этих материалов;

– достаточную механическую прочность сварных соединений разнородных материалов [11–13].

При выполнении сварки разнородных металлов и сплавов материалом промежуточного слоя часто служит никель, что обусловлено его благоприятными физико-химическими свойствами и хорошей металлургической совместимостью с большинством металлов [3–7]. Исследования диффузионной сварки с применением промежуточных слоев из различных порошков никеля с разной дисперсностью d — электролитического (ПНЭ-1, $d = 39,75$ мкм), карбонильного (ПНКОТ-1, $d = 7,63$ мкм) и ультрадисперсного, полученного термическим разложением формиата никеля $\text{Ni}(\text{COOH})_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ($d < 0,01$ мкм) — показало, что максимальная прочность достигается при сварке через ультрадисперсный порошок (УДП) [7, 11, 13]. Этот порошок имеет минимальный размер частиц, а величина удельной поверхности может регулироваться при пиролизе муравьинокислого никеля и достигать $20 \text{ м}^2/\text{г}$. Можно достичь и большей величины, но УДП становится пирофорным и, естественно, с ним сложно работать. Кроме того, этот УДП отличается чистотой продукта и отсутствием примесей.

Применение УДП никеля позволяет снизить температуру сварки до температур, частично или полностью исключающих образование хрупких интерметаллидных включений или жидких эвтектик между соединяемыми материалами. Этот фактор обуславливает получение диффузионных сое-

Таблица 1. Химический состав сплава ПТ-3В, мас. %

Элементы	Ti	Fe	V	Al	Zr	Si	C	N	Ост.
Содержание	91,39...95,0	до 0,25	1,2...2,5	3,5...5,0	до 0,3	до 0,12	до 0,1	до 0,4	0,45

Таблица 2. Химический состав 08X18H10T, мас. %

Элементы	Ti	Fe	Cu	Cr	P	S	Ni	Mn	Si
Содержание	0,4...1,0	67	до 0,3	17...19	до 0,035	до 0,02	9...11	до 2	до 0,8

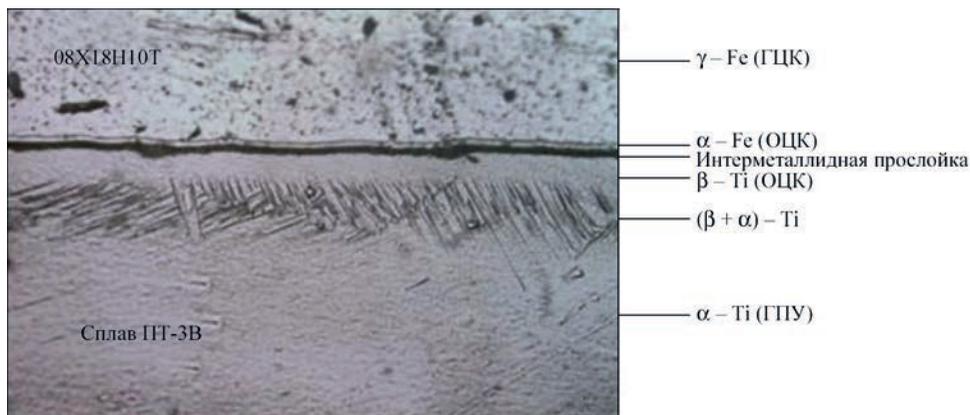


Рис. 1. Микроструктура ($\times 300$) сварного соединения сталь–титан, полученного диффузионной сваркой при режиме $T = 965\text{ }^\circ\text{C}$, $t = 1$ мин без применения промежуточных слоев [2, 9]

динений с высокими механическими свойствами [3–5, 7, 11].

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по отработке технологии диффузионной сварки аустенитной стали 08X18H10T со сплавом титана ПТ-3В через промежуточный слой из УДП никеля, представлены результаты металлографических исследований сварных соединений и механических испытаний на растяжение сварных образцов. В табл. 1, 2 приведен химический состав применяемых материалов.

Основной задачей работы являлось получение сварных диффузионных соединений с высокими стабильными механическими свойствами без недопустимых внутренних дефектов в сварных швах с обеспечением снижения температуры процесса соединения.

В качестве промежуточного слоя использовали УДП никеля, прокатанный в ленту толщиной 60 мкм и пористостью 55 %. Размер частиц исходного УДП никеля (основная фракция) — менее 0,01 мкм, удельная поверхность порошка около 17 м²/г. После прокатки УДП в ленту изменяется только величина удельной поверхности порошка, но не более, чем на 8 %. Но лента обеспечивает получение сварных швов, однородных по толщине и плотности, и в то же время позволяет реализовать чрезвычайно большой запас свободной энергии частиц порошка, из которых она состоит [7, 11–13].

Эксперименты проводили на цилиндрических образцах из титанового сплава ПТ-3В и стали 08X18H10T диаметром 20 мм и высотой 30 мм

каждый. Сварку осуществляли на установке диффузионной сварки СДВУ-50 с радиационным нагревом, обеспечивающей вакуум не хуже $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Между соединяемыми материалами помещали ленту из УДП никеля.

В процессе экспериментов варьировали температуру сварки T и время выдержки t , а сварочное давление $P = \text{const} = 27,5$ МПа.

Из полученной заготовки вырезали образец для металлографических исследований, которые проводили на микроскопе «Neophot» при увеличениях $\times 250$. Затем из исследованных образцов точили детали для механических испытаний на растяжение по стандартной методике.

Авторы работ [2, 9] рассмотрели особенности образования фаз при соединении стали 08X18H10T со сплавом ПТ-3В диффузионной сваркой напрямую, без промежуточных слоев. На основе изучения микроструктуры этого соединения (рис. 1) показано, что зона соединения характеризуется наличием прослойки интерметаллидов, образовавшихся между титаном и железом при $T = 965\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 мин. Этот режим обеспечивает прочность соединения около 255 МПа, что почти на 100 МПа ниже требуемого значения при эксплуатации данного узла.

В данном исследовании проведен анализ влияния промежуточного слоя из УДП никеля на прочность сварного соединения через рост интерметаллидных фаз при различных температурах диффузионной сварки. В табл. 3 приведены номера образцов, режимы их соединения и результаты испытаний на разрыв. Температура сварки образ-

цов № 2 и № 3 соответствовала температуре сварки образца № 1, так как необходимо было оценить влияние слоя УДП никеля на прочность сварного соединения. Как видно, в этом случае прочность гораздо ниже, чем при сварке без промежуточного слоя. В работе [11] показано, что это связано с высокой диффузионной активностью УДП никеля. Остальные температуры экспериментов (890 и 790 °С) взяты из критических точек диаграммы состояния Ni-Ti, а температура 760 °С — это температура, при которой прочное соединение сплавов ПТ-3В и 08Х18Н10Т без промежуточного слоя не происходит, а со слоем соединение имеет $\sigma_b = 355$ МПа.

Металлографические исследования сварных соединений, полученных диффузионной сваркой аустенитной стали и титанового сплава через слой УДП никеля, выявили их многослойную структуру (рис. 2). Они отличаются от микроструктуры, приведенной на рис. 1.

Сварка при 890 °С, 1 мин и 965 °С, 1 мин приводит к образованию фазы, которая, согласно диаграмме состояния Ti-Ni, является интерметаллидной фазой Ti₂Ni (рис. 2, а, б). Толщина этой фазы достигала 14 и 22 мкм, соответственно. Увеличение времени выдержки до 3 мин приводит к появлению эвтектической фазы Ti₂Ni + α + β толщиной до 128 и 152 мкм, соответственно (рис. 2, в, г).

Микроструктура металла соединений, полученных сваркой при 760 и 790 °С с выдерж-

Таблица 3. Образцы, изготовленные диффузионной сваркой через слой УДП никеля и без него

Номер образцов	Наличие промежуточного слоя	Температура T, °С	Время сварки t, мин	σ_b , МПа
1	Без слоя	965	1	255
2	УДП	965	1	150
3	УДП	965	3	140
4	Без слоя	890	1	250
5	УДП	890	3	53
6	УДП	790	10	349
7	УДП	790	5	311
8	УДП	790	20	311
9	УДП	790	15	307
10	УДП	760	15	355

кой 5...20 мин (рис. 3, 4), имеют следующие особенности:

- со стороны стали наблюдается слой никеля толщиной в среднем 40 мкм, содержащий поры;
- отсутствуют фазы α-Fe и β-Ti, характерные для диффузионного соединения стали с титаном без промежуточного слоя УДП, что указывает на отсутствие взаимодиффузии элементов стали и титанового сплава через слой никеля, т. е. диффузионное соединение образовалось по слою никеля;
- между слоем никеля и титановым сплавом наблюдается диффузионная зона, включающая интерметаллидную фазу Ti₂Ni толщиной до 12 мкм, зону взаимной диффузии до 10 мкм и слой (α+β)-Ti толщиной до 30 мкм, образовавшийся за счет диффузии никеля в титан.

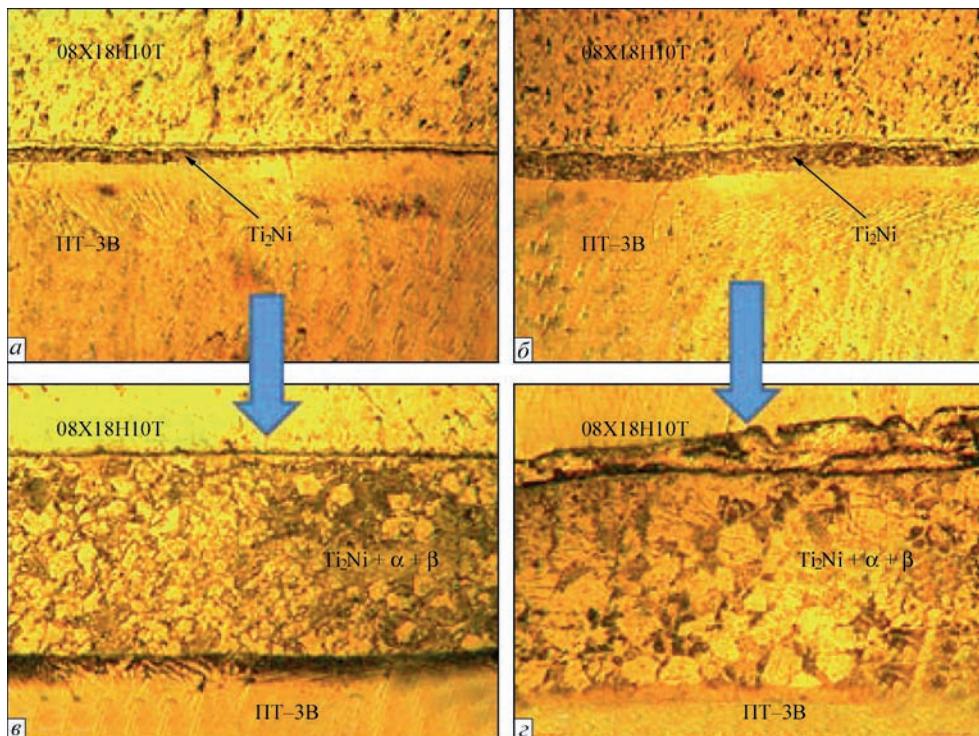


Рис. 2. Микроструктура металла (×250) сварных соединений, полученных диффузионной сваркой аустенитной стали с титановым сплавом через промежуточный слой из УДП никеля по режимам: а — 890 °С, 1 мин; б — 965 °С, 1 мин; в — 890 °С, 3 мин; г — 965 °С, 3 мин

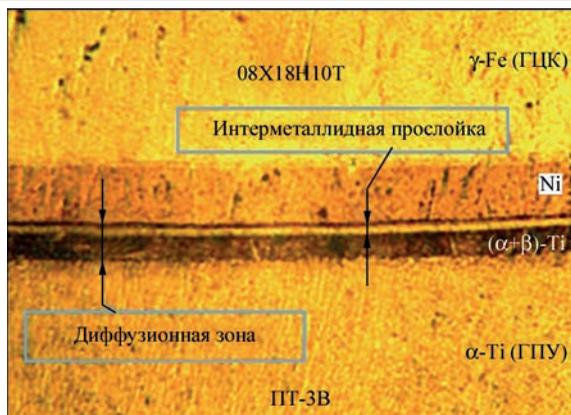


Рис. 3. Микроструктура металла ($\times 250$) сварного соединения аустенитной стали с титановым сплавом, полученного диффузионной сваркой при $790\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 мин через промежуточный слой из УДП никеля

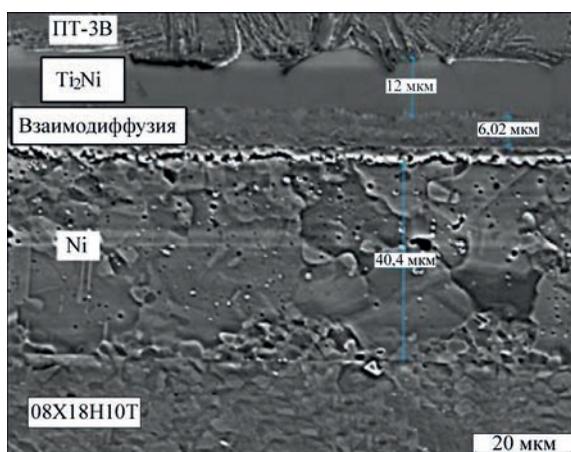


Рис. 4. Микроструктура металла сварного соединения аустенитной стали с титановым сплавом, полученного диффузионной сваркой при $760\text{ }^{\circ}\text{C}$, 15 мин через промежуточный слой из УДП никеля

Из табл. 1 видно, что применение промежуточных прослоек при температуре 965 и $890\text{ }^{\circ}\text{C}$ отрицательно сказалось на прочности сварного соединения по сравнению с результатами сварки без применения промежуточных слоев. Образцы, сваренные при температурах $760\text{...}790\text{ }^{\circ}\text{C}$, имеют предел прочности в среднем равный 346 МПа . Это можно объяснить минимальной зоной интерметаллидной прослойки в сварном соединении и долговременной взаимной диффузией соединяемых материалов.

Выводы

1. Применение УДП никеля при температурах 965 и $890\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к образованию сплошного слоя твердых интерметаллидов. При температуре $790\text{ }^{\circ}\text{C}$ диффузионная зона имеет многослойную структуру, отличающуюся от микроструктуры соединения сталь–титан, полученного без промежуточного никелевого слоя. Со стороны стали наблюдается широкий слой никеля, а со стороны титана — слой $(\alpha+\beta)\text{-Ti}$.

2. Механические испытания сварных образцов на растяжение показали, что наибольшие значения предела прочности достигнуты при температуре сварки $760\text{...}790\text{ }^{\circ}\text{C}$ и составили в среднем 346 МПа .

3. Проведенная работа подтверждает положительный эффект от использования высокоактивных УДП никеля при сварке титана со сталью. Появляется возможность проводить сварку при температурах $760\text{...}790\text{ }^{\circ}\text{C}$, избегая образования хрупких интерметаллидных фаз непосредственно между сплавами ПТ-3В и 08X18H10T. Интерметаллидные слои, образующиеся между промежуточным слоем и титановым сплавом при температуре $760\text{ }^{\circ}\text{C}$, не оказывают решающего влияния на прочность сварного соединения.

Список литературы

1. Казаков Н.Ф. (1976) *Диффузионная сварка материалов*. Москва, Машиностроение.
2. Уваров А.А., Семенов А.Н., Крестников Н.С. и др. (2017) Исследование структуры сварных соединений сталь – титан, полученных диффузионной сваркой с применением ультрадисперсного порошка никеля. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **8**, 57–61.
3. Киреев Л.С., Замков В.Н. (2002) Сварка титана со сталью в твердой фазе. *Автоматическая сварка*, **7**, 34–40.
4. Устинов А.И., Фальченко Ю.В., Мельниченко Т.В. и др. (2015) Диффузионная сварка в вакууме нержавеющей стали через пористые прослойки никеля. *Там же*, **7**, 5–11.
5. Бачин В.А., Квасницкий В.Ф., Котельников Д.И. и др. (1991) *Теория, технология и оборудование диффузионной сварки*. Москва, Машиностроение.
6. Каракозов Э.С. (1976) *Соединение металлов в твердой фазе*. Москва, Металлургия.
7. Люшинский А.В. (2006) *Диффузионная сварка разнородных материалов*. Москва, Академия.
8. Хансен М., Андерко К. (1962) *Структуры двойных сплавов*. Т. 1, 2. Москва, Металлургия.
9. Уваров А.А., Семенов А.Н., Новожилов С.Н. и др. (2014) Технология изготовления биметаллических переходников аустенитная сталь – сплав α -титана. *Сварочное производство*, **4**, 34–36.
10. Родин М.Е., Семенов А.Н., Плышевский М.И. и др. (2008) Исследование механических свойств сварных соединений коррозионностойкой стали со сплавами титана. *Там же*, **6**, 9–11.
11. Люшинский А.В., Мазанко В.Ф., Белякова М.Н., Ворона С.П. (1999) Массоперенос при сварке давлением с применением УДП никеля. *Там же*, **6**, 10–14.
12. Люшинский А.В. (2013) *Современные технологии сварки. Инженерно-физические основы*. Москва, ИД «Интеллект».
13. Люшинский А.В. (2001) Критерии выбора промежуточных слоев при диффузионной сварке разнородных материалов. *Сварочное производство*, **5**, 40–43.

References

1. Kazakov, N.F. (1976) *Diffusion welding of materials*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Uvarov, A.A., Semenov, A.N., Krestnikov, N.S. et al. (2017) Examination of structure of steel-titanium welded joints, produced by diffusion welding using ultrafine nickel powders. *Metallvedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **8**, 57–61 [in Russian].
3. Kireev, L.S., Zamkov, V.N. (2002) Solid-state joining of titanium to steel (Review). *The Paton Welding J.*, **7**, 29–35.

4. Ustinov, A.I., Falchenko, Yu.V., Melnichenko, T.V. et al. (2015) Vacuum diffusion welding of stainless steel through porous nickel interlayers. *Ibid.*, 7, 3-9.
5. Bachin, V.A., Kvasnitsky, V.F., Kotelnikov, D.I. et al. (1991) *Theory, technology and equipment for diffusion welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
6. Karakozov, E.S. (1976) *Solid-state joining of metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
7. Lyushinsky, A.V. (2006) *Diffusion welding of dissimilar materials*. Moscow, Akademiya [in Russian].
8. Khansen, M., Anderko, K. (1962) *Structures of binary alloys*. Vol. 1, 2. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
9. Uvarov, A.A. Semenov, A.N., Novozhilov, S.N. et al. (2014) Technology of manufacture of bimetal transition pieces from austenitic steel- α -titanium alloy. *Svarochn. Proizvodstvo*, 4, 34-36 [in Russian].
10. Rodin, M.E., Semenov, A.N., Plyshevsky, M.I. et al. (2008) Investigation of mechanical properties of corrosion-resistant steel welded joints with titanium alloys. *Ibid.*, 6, 9-11 [in Russian].
11. Lyushinsky, A.V., Mazanko, V.F., Belyakova, M.N., Vorona, S.P. (1999) Mass transfer in pressure welding using ultrafine nickel powders. *Ibid.*, 6, 10-14.
12. Lyushinsky, A.V. (2013) *Modern welding technologies. Engineering-physical principles*. Moscow, ID Intellect [in Russian].
13. Lyushinsky, A.V. (2001) Criteria of selection of interlayers in diffusion welding of dissimilar materials. *Svarochn. Proizvodstvo*, 5, 40-43 [in Russian].

ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО ПОРОШКУ НІКЕЛЮ ДЛЯ ДИФУЗІЙНОГО З'ЄДНАННЯ ТИТАНУ З НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛЛЮ

А.В. Люшинський

АТ «Раменське приладобудівне конструкторське бюро».

140103, м. Раменське, РФ, вул. Гур'єва, 2. E-mail: nilsvarka@yandex.ru

Розглянуто особливості з'єднання титанового сплаву ПТ-3В зі сталлю 08X18N10T дифузійним зварюванням із застосуванням проміжного шару з ультрадисперсного порошку нікелю, одержуваного термічним розкладанням формиату нікелю $\text{Ni}(\text{COOH})_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. Проведено порівняння структур зварних з'єднань даних матеріалів на наявність інтерметалідних фаз при зварюванні без проміжних шарів та з нікелевим проміжним шаром при різних параметрах режиму. Застосування ультрадисперсного порошку нікелю за температур 965 і 890 °C призводить до утворення суцільного шару твердих інтерметалідів. За температури 790 °C дифузійна зона має багатшарову структуру, що відрізняється від мікроструктури з'єднання сталь-титан, отриманого без проміжного нікелевого шару. Механічні випробування зварних з'єднань на розрив показали, що достатні міцнісні властивості досягаються при використанні проміжного шару з ультрадисперсного порошку нікелю за знижених температури і тиску, що виключають інтенсивне зростання інтерметалідів. Найбільші значення межі міцності досягнуто за температур зварювання 760...790 °C і склали в середньому 346 МПа. Бібліогр. 13, табл. 3, рис. 4.

Ключові слова: дифузійне зварювання, проміжний шар, ультрадисперсний порошок

APPLICATION OF ULTRAFINE NICKEL POWDER FOR DIFFUSION JOINING OF TITANIUM TO STAINLESS STEEL

A.V. Lyushinskiy

JSC «Ramenskoje Instrument Design Bureau». 2 Gurjeva Str., 140103, RF. E-mail: nilsvarka@yandex.ru

The paper deals with the features of joining titanium alloy PT-3V to steel 08Kh18N10T by diffusion welding with application of an interlayer of ultrafine nickel powder, produced by thermal decomposition of nickel formate $\text{Ni}(\text{COOH})_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. Comparison of the structures of welded joints of these materials for presence of intermetallic phases in welding without interlayers and with a nickel interlayer at different mode parameters was performed. Application of ultrafine nickel powder at temperatures of 965 and 890 °C leads to formation of a continuous layer of solid intermetallics. At the temperature of 790 °C the diffusion zone has a multilayer structure, differing from the microstructure of steel-titanium joint, produced without the nickel interlayer. Mechanical rupture testing of the welded joints showed that sufficient strength properties are achieved at application of an interlayer of ultrafine nickel powder at lower temperature and pressure, preventing intensive growth of intermetallics. The highest values of ultimate strength were achieved at welding temperature of 760 – 790 °C and were equal to 346 MPa on average. 13 Ref., 3 Tabl., 4 Fig.

Keywords: diffusion welding, interlayer, ultrafine powder

Поступила в редакцію 31.01.2019



ООО «Фрониус Украина»

проводит семинары:

15 мая 2019 г. — «Автоматизация сварочных процессов»

20 июня 2019 г. — «Роботизация сварочных процессов»

Контакты: тел.: +38 044 277-21-41;

факс: +38 044 277-21-44

E-mail: sales.ukraine@fronius.com

www.fronius.ua