

СЕКЦИЯ 11

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.791.01

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДА ТИТАНА

*С. В. Наумов¹, Д. О. Панов¹, М. Н. Япрынцев², Р. С. Черниченко¹,
В. В. Миронцов¹, Г. А. Салищев¹*

¹Лаборатория объемных наноструктурных материалов, НИУ «БелГУ», г. Белгород, Россия

²ЦКП «Технологии и Материалы НИУ «БелГУ», г. Белгород, Россия

Аннотация. В работе предложены способы диффузионной и электрической сварки сопротивлением в которых реализуется технология с отсутствием необходимости расплавлять металл в зоне сварки, благодаря чему отсутствует и зона термического влияния. Приведены технологические режимы диффузионной и электрической сварки сопротивлением с получением оптимального структурного состояния сварного соединения, обеспечивающие прочностные свойства на уровне 90 % от исходного материала.

Введение

Сплавы на основе орторомбического алюминид титана Ti_2AlNb являются перспективными материалами для применения в авиастроении и аэрокосмической отрасли благодаря их низкой плотности, высокой удельной прочности и превосходной стойкости к окислению и ползучести [1,2]. Также сплавы Ti_2AlNb ($\sim 5,1$ г/см³) имеют более высокую температуру эксплуатации, чем титановые сплавы и на $\sim 40\%$ меньшую плотность по сравнению с суперсплавами на основе никеля ($7,7-9,0$ г/см³) [3-5]. Однако технологические свойства этих сплавов при получении неразъемных соединений, например, свариваемость, ограничивают возможности их применения.

В настоящее время проведены работы по исследованию пайки, диффузионной, аргонодуговой, электрической контактной точечной сварки, электронно-лучевой и лазерной сварки, а также сварки трением с перемешиванием сплавов на основе Ti_2AlNb . Пайка требует использования относительно низких давлений на короткое время, что делает этот процесс экономичным, но в составе паянного соединения часто присутствуют нежелательные интерметаллиды [6]. Несмотря на то, что при диффузионной сварке достигается высокое качество

сварного соединения, этот процесс обладает низкой производительностью, при этом технологические параметры должны более тщательно контролироваться [7, 8]. Аргонодуговая сварка является универсальным методом сварки титановых сплавов, но имеются проблемы с пористостью при сварке Ti_2AlNb [9]. Электрическая контактная сварка является высокоэффективным и высокоавтоматизированным методом сварки, однако остаточные напряжения могут приводить к образованию трещин в литом ядре [10]. Резистивный нагрев проходящим электрическим током для сварки, термообработки и формовки сплавов на основе Ti_2AlNb в настоящее время недостаточно изучен и апробирован [11]. Сварка трением с перемешиванием обладает высокой эффективностью и низкой энергоемкостью, однако имеются ограничения по стойкости рабочего инструмента и размерам сварной конструкции [12]. Электронно-лучевая и лазерная сварки обладают высокой эффективностью и автоматизацией процесса [13]. Однако, электронно-лучевая сварка требует создания вакуума, что делает этот способ менее производительным по сравнению с лазерной сваркой, с одной стороны, а более узкий сварной шов с малой зоной термического влияния приводит к возникновению высоких растягивающих напряжений и последующему растрескиванию зоны сварки, с другой стороны [14]. Лазерная сварка позволяет получать высокоточные конструкции без дополнительных механических правок, однако, как и в других методах сварки плавлением, структурные превращения в зонах сварного шва приводят к снижению механических свойств и/или образованию трещин Ti_2AlNb [15, 16].

Рассматривая преимущества и недостатки различных способов получения неразъемных соединений, предпочтительным для получения качественного сварного соединения сплавов на основе Ti_2AlNb являются диффузионные методы, так как отсутствует необходимость расплавлять металл в зоне сварки и, следовательно, отсутствует зона термического влияния [17]. Несмотря на то, что при диффузионных методах сварки достигается высокое качество сварного соединения, технологические параметры должны более тщательно контролироваться. Таким образом, целью данной работы является определение влияния режимов диффузионной и электрической сварки сопротивлением на установке SPS 10–3 на качество сварного соединения из сплава на основе орторомбического алюминиды титана Ti_2AlNb .

Методы исследований

В экспериментальных работах использован сплав Ti-23Al-23Nb-1,4V-0,8Zr-0,4Mo-0,4Si ат. % (ВТИ-4). Диффузионная сварка проводилась на установке искрового плазменного спекания SPS 10–3 по циклу сварки на рис. 1, а, где нагрев заготовок осуществлялся проходящими импульсными токами через пуансоны 1 и 5 и графитовую матрицу 3, а вакуум в процессе сварки составлял 10^{-3} Торр (рис. 1, б). С целью предотвращения прохождения электрического тока через заготовки 4 были спрессованы и подготовлены корундовые подложки 2, предотвращающие контакт пуансонов и заготовок. Кроме того, в работе использован метод электрической сварки сопротивлением, проходящего постоянного импульсного тока (80-90 % от мощности источника тока в 3000 А) через свариваемые заготовки из сплава ВТИ-4, которые были зафиксированы между графитовыми пуансонами (рис. 1, в).

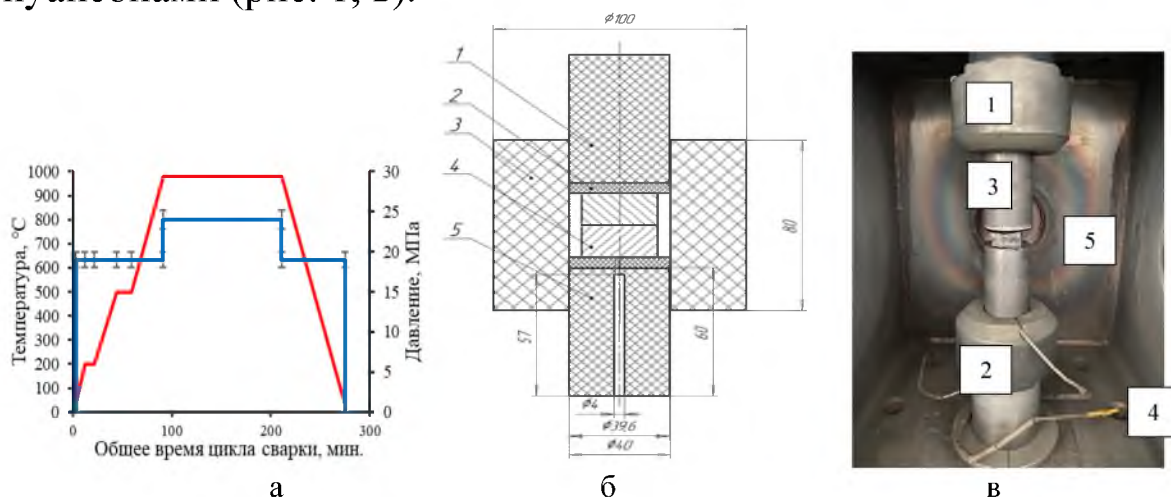


Рисунок 1. а) циклограмма диффузионной сварки на оборудовании SPS 10–3; б) схема размещения заготовок: 1 – верхний пуансон; 2 – корундовая вставка; 3 – матрица; 4 – свариваемые заготовки; 5 – нижний пуансон с технологическим отверстием под термопару; в) схема размещения заготовок перед электрической сваркой сопротивлением: 1 – гидравлический цилиндр, 2 – графитовая вставка, 3 – пуансоны, 4 – термопара, 5 – свариваемые заготовки.

Экспериментальные результаты и обсуждение

По результатам механических испытаний после диффузионной сварки установлено, что наиболее высокие прочностные свойства диффузионного соединения из сплава на основе Ti_2AlNb достигаются при температурах 940 °C и 960 °C, времени 2 ч, давлении 15 МПа: 1180 МПа σ_B , 1010 МПа $\sigma_{0,2}$, что соответствует ~90 % от прочности исходного металла (1390 МПа σ_B , 1320 МПа $\sigma_{0,2}$). Увеличение

давления сжатия при сварке до 25 МПа при температуре 960 °С показало увеличение прочностных свойств сварных соединений 1240 МПа σ_B , 1070 МПа $\sigma_{0,2}$. В то же время относительное удлинение с ростом температуры сварки с 920 °С до 960 °С при давлении 15 МПа увеличивается и достигает 3,8 %, при температуре сварки 960 °С и давлении 25 МПа при остальных равных условиях пластичность увеличивается и составляет 4,6 %. При температуре сварки 940 и 960 °С микротвердость находится на уровне $395 \pm 30 \text{ HV}_{0,2}$, что выше, чем при 920 °С и 980 °С ($360 \pm 25 \text{ HV}_{0,2}$), и соответствует уровню твердости исходного материала ($400 \pm 10 \text{ HV}_{0,2}$). Микротвердость диффузионного соединения, полученного электрической контактной сваркой сопротивлением, находится в пределах $355 \pm 15 \text{ HV}_{0,2}$, что ниже, чем у сварных соединений после диффузионной сварки.

Все эти изменения связаны со структурными изменениями в области диффузионного соединения и в объеме заготовки в целом (рис. 2). С увеличением температуры сварки увеличивается содержание О-фазы в заготовках, почти не изменяется содержание α_2 -фазы (940 °С: 45 % О-фазы, 6 % α_2 -фазы; 960 °С: 54 % О-фазы, 10 % α_2 -фазы). Рост содержания О-фазы обусловлен низкой скоростью охлаждения (15 °С/мин) с температуры сварки до комнатной.

При электрической контактной сварке сопротивлением доля О-фазы в зоне сварки ниже, чем при диффузионной сварке (37 % О-фазы, 15 % α_2 -фазы), что обусловлено более быстрым нагревом: при продолжительности времени сварки 10 сек зафиксирована температура на термопаре >800 °С, время охлаждения до 100 °С составило 15 мин. Давление при прохождении тока находилось на уровне 15 МПа, дополнительное давление после отключения тока составило 20-25 МПа. В целом сварное соединение плотное, дефектов в виде непроваров и включений на границе стыка не обнаружено (рис. 2, б).

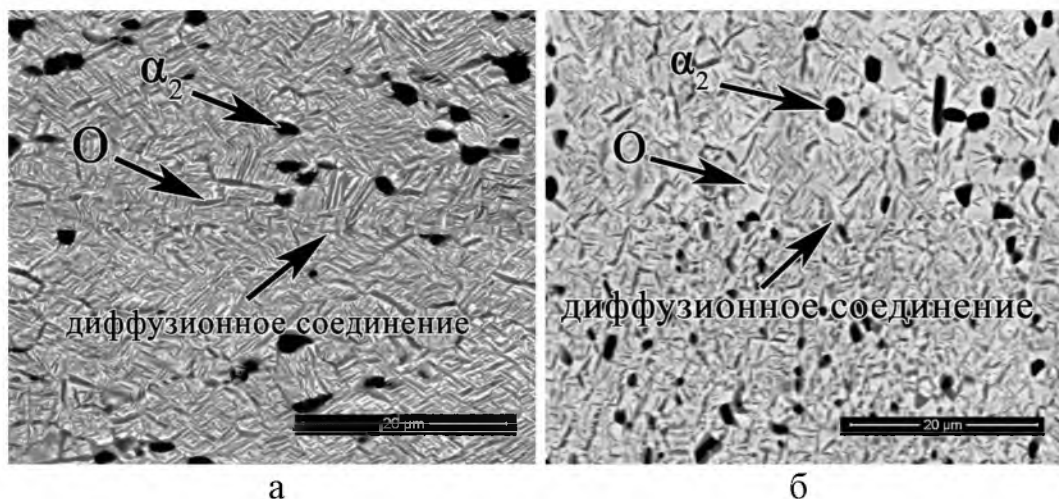


Рисунок 2. Микроструктура диффузионного соединения сплава на основе Ti_2AlNb , $\times 5000$: а) диффузионная сварка; б) электрическая контактная сварка сопротивлением.

После термической обработки (закалка + старение) диффузионных соединений наблюдается увеличение количества O-фазы в структуре с ростом температуры сварки ($940\text{ }^\circ\text{C}$: 61 % O-фазы, 7 % α_2 -фазы; $960\text{ }^\circ\text{C}$: 72 % O-фазы, 11 % α_2 -фазы). При этом происходит увеличение прочностных свойств и микротвердости, что связано с ростом содержания O- и α_2 -фаз в зоне диффузионного соединения.

Заключение

Диффузионные методы сварки на установке искрового плазменного спекания SPS 10–3 при температуре сварки $940\text{--}960\text{ }^\circ\text{C}$, времени до 2 ч, давлении до 25 МПа с последующим охлаждением со скоростью $15\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ и последующей термической обработкой (закалка + старение) позволяют обеспечить равнопрочность диффузионного соединения на уровне 90 % от основного металла. Показана возможность проведения электрической контактной сварки сопротивлением для сплавов на основе Ti_2AlNb на установке SPS 10–3, обеспечивающей необходимый уровень вакуума, нагрузки, время и температуры, мощность источника питания с целью получения качественных сварных соединений.

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Соглашение №19–79–30066) с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Технологии и Материалы НИУ "БелГУ".

Литература

1. Banerjee D. A new ordered orthorhombic phase in a Ti_3AlNb alloy / D. Banerjee [et al.] // *Acta Metall.* 1988. V. 36. № 4. P. 871–882.
2. Banerjee D. The intermetallic Ti_2AlNb // *Prog. Mater. Sci.* 1997. V. 42. № 1–4. P. 135–158.
3. Wang L. Microstructures and mechanical properties of a laser-welded joint of Ti_3Al-Nb alloy using pure Nb filler metal / L. Wang [et al.] // *Metals (Basel)*. 2018. V. 8. № 10.
4. Shagiev M.R. Ti_2AlNb -Based intermetallic alloys and composites / M.R. Shagiev, R.M. Galeev, O.R. Valiakhmetov // *Mater. Phys. Mech.* 2017. V. 33. № 1. P. 12–18.
5. Pollock T.M., Tin S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure, and properties // *J. Propuls. Power.* 2006. V. 22. № 2. P. 361–374.
6. Cai X.Q. Transient liquid phase (TLP) bonding of Ti_2AlNb alloy using Ti/Ni interlayer: Microstructure characterization and mechanical properties / X.Q. Cai [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. V. 679, P. 9–17.
7. Li X. Investigation on electrically-assisted diffusion bonding of Ti_2AlNb alloy sheet by microstructural observation, mechanical tests and heat treatment / X. Li [et al.] // *Materials and Design*. 2018. V. 157.
8. Zhu F. Role of thermal cycle in joining Ti-6Al-4V and Ti_2AlNb -based alloys through diffusion bonding and post heat treatment / F. Zhu, C. Chen, X. Li, J. Chen // *Materials Characterization*. 2019. V. 156. 109830.
9. Liu X. Ultrasonic frequency pulse tungsten inert gas welding of Ti_2AlNb -based alloy / X. Liu [et al.] // *Xiyou Jinshu/Chinese J. Rare Met.* 2014. V. 38, № 4. P. 541–547.
10. Cai D. Reheat cracking in Ti_2AlNb alloy resistance spot weldments / D. Cai, J. Chen, X. Mao, C. Hao // *Intermetallics*. 2013. V. 38. P. 63–69.
11. Wang G. Temperature distribution and effect of low-density electric current on B2+O lamellar microstructure of Ti_2AlNb alloy sheet during resistance heating / G. Wang [et al.] // *Journal of Central South University*. 2019. V. 26 (3). P. 550–559.
12. Chen X. Effects of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of linear friction welded Ti_2AlNb alloy [J] / X. Chen [et al.] // *Materials & Design*. 2016. V. 94. P. 45–53.
13. Zou J. Review on Weldability of Ti_2AlNb -Based Alloy / J. Zou, H. Li // *Materials China*. 2019. V. 38. P. 710–716.
14. Li Y.-J. Mechanism of reheat cracking in electron beam welded Ti_2AlNb alloys / Y.-J. Li [et al.] // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 2019. V. 29. P. 1873–1881.
15. Zhang P. A review on the effect of laser pulse shaping on the microstructure and hot cracking behavior in the welding of alloys / P. Zhang [et al.] // *Opt. Laser Technol.* 2021. V. 140.
16. Panov D.O. Cracking of Ti_2AlNb -based alloy after laser beam welding / D.O. Panov [et al.] // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2021. V. 1014, № 1.
17. Скупов А.А. Создание неразъемных соединений из интерметаллидных титановых сплавов (обзор) / А. А. Скупов [и др.] // *Легкие сплавы. Труды ВИАМ*. 2021. № 7. С. 31–38.