

УДК 621.791.669.71.669.295

## ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СВАРКОПАЙКИ ТИТАН-АЛЮМИНИЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ (Обзор)

А. С. МИЛЕНИН, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведен анализ ключевых проблем, возникающих при сваркопайке разнородных соединений титана и алюминия. Показаны закономерности процессов, определяющих эксплуатационные характеристики разнородных конструкций. Приведены рекомендации по оптимизации технологических процессов, позволяющие получать качественные титан-алюминиевые сварнопаяные узлы.

*Ключевые слова:* сваркопайка, титан, алюминий, сварные соединения, интерметаллидные фазы, диаграммы состояния, оптимизация процесса соединения.

В настоящее время сварные конструкционные элементы и узлы из разнородных металлов находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности.

Преимущества разнородных сварных деталей по сравнению с однородными очевидны. Применение легких металлов и сплавов позволяет уменьшить массу отдельных элементов, что особенно важно в аэрокосмической отрасли и автомобилестроении. Использование металлов с высокой коррозионной стойкостью повышает ресурс узлов, контактирующих с агрессивными средами, например, морских судов, оффшорных конструкций, трубопроводов. С помощью разнородных сварных деталей можно увеличить несущую жесткость конструкционных элементов, снизить себестоимость изделия за счет замены дорогостоящего сплава более дешевым аналогом [1–3].

Однако получение разнородных сварных соединений удовлетворительного качества сопряжено с определенными трудностями, вызванными как металлургической несовместимостью свариваемых металлов, так и технологическими особенностями сварки [4–6].

Титан-алюминий — одна из наиболее перспективных пар конструкционных материалов с точки зрения комплекса ценных эксплуатационных свойств получаемого разнородного сварного соединения. Эти металлы отличаются высокой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах, хорошим соотношением прочности и пластичности, сравнительно небольшим удельным весом. Кроме того, титан и сплавы на его основе имеют высокие

прочностные характеристики. Некоторые физические свойства этих металлов представлены ниже [7, 8].

Таким образом, использование титан-алюминиевых деталей и узлов позволяет улучшить механические и коррозионные свойства конструкций, повысить их сопротивляемость усталости, а также продлить ресурс эксплуатации [9, 10].

Однако для получения качественных сварных титан-алюминиевых соединений при разработке и оптимизации соответствующего сварочного цикла необходимо принимать во внимание ряд трудностей, неизбежное возникновение которых обусловлено характерными физико-химическими и металлургическими процессами, а также спецификой выбранной технологии сварки.

Существенной проблемой при сварке разнородных соединений из металлов с ограниченной взаимной растворимостью является риск формирования в области контакта различного рода ин-

Физические характеристики	Титан	Алюминий
Температура плавления, К	1941	933
Температура кипения, К	3603	2767
Удельная теплота плавления, кДж/кг	315,24	397
Удельная теплота кипения, кДж/кг	8559,5	10777
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	4505	2698
Теплопроводность, Вт/(м·К)	18,8	225,4
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	0,54	0,90
Модуль Юнга, ГПа	112	72,5
Коэффициент Пуассона	0,31	0,33
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	8,2	24,3
Предел прочности, МПа	262	150
Предел текучести, МПа	186	120

*Примечание.* Значения всех физических характеристик, зависящих от температуры, взяты при 20 °С.

© А. С. Миленин, 2008

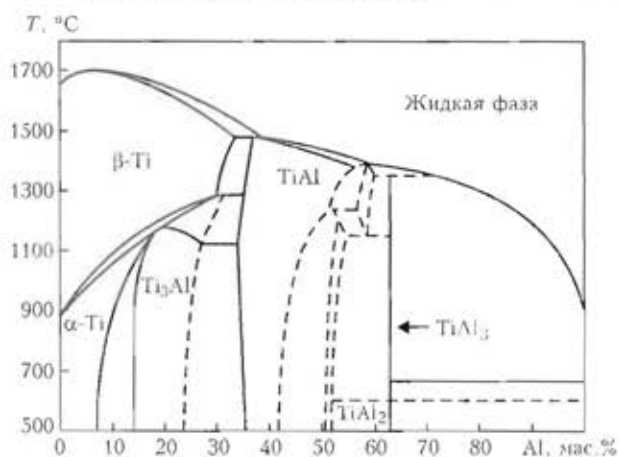


Рис. 1. Диаграмма состояния двойной системы титан-алюминий [9]

терметаллидных фаз, которые могут отрицательно влиять на качество сварной конструкции.

Как видно из диаграммы состояния двойной системы титан-алюминий (рис. 1), взаимная растворимость этих элементов невелика. Если содержание алюминия в твердом растворе титана достигает 7 мас. %, что позволяет эффективно использовать его для легирования большинства титановых сплавов, то титан практически нерастворим в алюминии и уже при содержании его свыше 0,03 мас. % в растворе выделяется интерметаллидное соединение  $TiAl_3$ . Значительное увеличение содержания интерметаллидных фаз в сварном соединении повлечет резкое снижение механических свойств конструкции и сделает невозможной ее эффективную эксплуатацию [11].

Этот факт не позволяет применять для получения титан-алюминиевых соединений те способы сварки, при которых происходит плавление обоих металлов с последующим перемешиванием их жидких фаз. Одним из возможных решений данной проблемы может быть использование различных способов сварки в твердой фазе (сварка взрывом, диффузионная сварка и др.) [12, 13]. Однако эти технологии вносят определенные ограничения на геометрию соединения и существенные допуски на остаточное деформированное состояние изделия и в связи с этим не всегда применимы.

Существенная разница между температурой плавления титана и алюминия обуславливает применение сваркопайки как наиболее эффективного способа их соединения.

Основная идея этого способа заключается в том, что в результате теплового воздействия сварочного источника в области разнородного контакта плавится только алюминиевая часть изделия, тогда как титановая остается твердой. В результате смачивания расплавленным алюминием твердого титана и их поверхностного взаимодействия образуется сварнопаяное соединение [2-4,

9-10, 14, 15]. Кратковременность этого взаимодействия, а также относительно низкие температуры в области разнородного контакта позволяют снизить риск образования нежелательных охрупчивающих интерметаллидных слоев, что в рассматриваемом случае объясняется природой процессов реакционной диффузии.

Процесс формирования интерметаллидного слоя у поверхности разнородного контакта может быть условно разделен на ряд последовательных этапов [16]:

релаксация пика межфазной энергии на границе жидкий металл-твердый металл;

формирование островков новой фазы в местах образования микродефектов на поверхности твердого металла, рост этих островков вдоль поверхности контакта и смыкание их в сплошной слой;

нормальный диффузионный рост интерметаллидного слоя.

Толщина интерметаллидного слоя, сформированного в течение первых двух этапов, невелика (менее 5 мкм), что не вызывает существенного снижения значений технологических характеристик сварного соединения. Суммарная длительность этих этапов определяет так называемый латентный период образования интерметаллидов [10, 14]. Именно наличие этого периода позволяет избежать появления в сварных соединениях титана и алюминия хрупких интерметаллидных слоев с толщиной, достаточной для значительного ухудшения эксплуатационных свойств сварного узла.

Несмотря на то, что на диаграмме состояния двойной системы титан-алюминий (рис. 1) показано наличие четырех стабильных интерметаллидных соединений, в случае сваркопайки титана и алюминия возможно формирование только слоя стехиометрического соединения  $TiAl_3$ , тогда как количество других интерметаллидных фаз либо пренебрежимо мало, либо они вообще отсутствуют. Автор работы [17] связывает это с различием между скоростью образования интерметаллидного соединения и скоростью поступления элементов в область поверхностного контакта жидкого алюминия и твердого титана, где происходит химическая реакция. Длительность латентного периода в свою очередь является функцией температуры указанной области [4]. Эта температурная зависимость, полученная экспериментально, приведена на рис. 2.

Соответственно оптимизация конкретного процесса сваркопайки с целью исключения длительного перегрева области контакта титана и алюминия позволяет снизить риск формирования интерметаллидных слоев значительной толщины и избежать деградации эксплуатационных характеристик разнородной сварной конструкции.

Химическая реакция образования интерметаллидного соединения  $TiAl_3$  является экзотермичес-

кой, поэтому следовало бы ожидать локального перегрева в области разнородного контакта [7]. Однако в связи с небольшой толщиной образующихся слоев интерметаллида можно ожидать, что теплота, выделяющаяся в результате данной химической реакции, не окажет существенного влияния на кинетику температурного поля.

Кроме того, поскольку глубина взаимного диффузионного проникновения атомов титана и алюминия в реальных процессах сваркопайки достаточно невелика, то риск образования пор и локальных деформаций вследствие существенной разницы парциальных коэффициентов диффузии элементов (эффект Киркендалла) минимален [16].

В целом уровень риска деградации эксплуатационных свойств титан-алюминиевого сварнопаяного соединения достаточно чувствителен к изменению технологических параметров сварки. Поэтому одной из основных задач при разработке соответствующей технологии является обеспечение стабильности сварочного процесса, что достигается, например, использованием лучевых методов сварки (лазерной, электронно-лучевой) [9].

В случае сваркопайки изделий большой длины возможно неоднородное по длине смачивание жидким алюминием титановой поверхности вследствие, например, флуктуаций теплового воздействия источника сварочного нагрева. Для обеспечения однородного контакта вдоль шва и качественного соединения используют предварительное алитирование титановой кромки [10].

Одной из особенностей титана является его значительное сродство к кислороду и азоту, насыщение которыми приводит к охрупчиванию металла и, как следствие, к снижению эксплуатационных свойств сварной конструкции. Поэтому при сварке необходимо предусмотреть наличие защитных газов (аргон) или вакуума [18].

Характерным процессом, который может оказать влияние на качество паяных, сварнопаяных, а также сварных соединений, является эффект Ребиндера [6]. Его наличие способствует деформированию и разрушению веществ кристаллического строения, а также самопроизвольному протеканию структурных изменений в результате уменьшения их свободной поверхностной энергии при контакте с веществами, способными к адсорбции на межфазной поверхности. Кроме того, если металл, поверхность которого смачивается адсорбционно-активным веществом, находится под воздействием растягивающих усилий, это может привести к спонтанному развитию поверхностных дефектов и перерастанию их в открытые трещины.

Зачастую существенное снижение прочности одного металла, смачиваемого другим, происходит, если их взаимодействие описывается простой эвтектической диаграммой с небольшой раство-

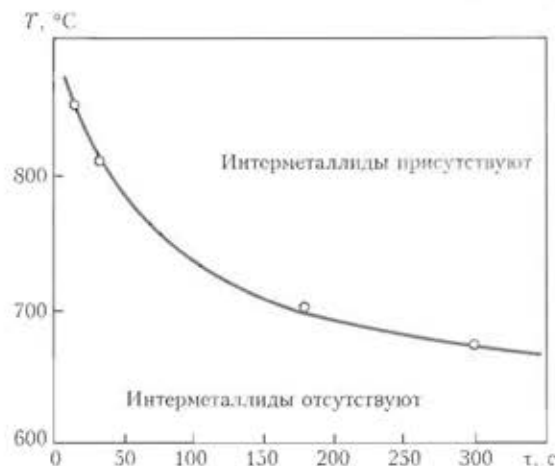


Рис. 2. Температурная зависимость длительности латентного периода образования интерметаллидного соединения  $TiAl_3$  в области поверхностного контакта твердого титана с жидким алюминием [14]

римостью в твердом состоянии; этому соответствует малая положительная энергия смешения компонентов. Однако это явление обычно не наблюдается в системах с малой интенсивностью взаимодействия компонентов (взаимной нерастворимостью), а также при очень большом взаимном сродстве, особенно, если компоненты вступают в химическую реакцию.

Эффект Ребиндера характерен, например, для сварки нержавеющей стали и меди [4]. Что касается разнородной пары титан-алюминий, существенное различие в кристаллическом строении этих металлов позволяет сделать вывод о низком влиянии жидкого алюминия на поверхностную энергию титана. Поэтому снижение прочности поверхности титановой части сварного соединения при смачивании ее расплавленным алюминием маловероятно.

Одной из основных проблем, возникающих при эксплуатации разнородных соединений, является склонность к коррозии подобных конструктивных узлов в агрессивных средах [19].

И титан, и алюминий характеризуются значительной коррозионной стойкостью в силу образования на их поверхностях плотных оксидных плен. Однако в области разнородного контакта коррозионное разрушение может инициироваться гальваническими процессами (гальваническая или контактная коррозия). Степень корродирования в таком случае зависит от разности стационарных потенциалов металлов, образующих контакт, и их коррозионных характеристик в данных условиях.

Экспериментальные исследования коррозии в синтетической морской воде показали, например, что при контакте с титаном потеря массы алюминиевого сплава AMg61 ( $Al-(5,5...6,5)Mg-(0,7...1,1)Mn$ ) в неподвижной воде за 245 сут составляет  $2,0 \text{ мг/см}^2$  (без титана —  $0,6 \text{ мг/см}^2$ ), при относительной скорости воды  $10...12 \text{ м/с}$  —



17,5 мг/см<sup>2</sup> (без титана 12,1 мг/см<sup>2</sup>) за 83 сут [20]. Коэффициент ускорения коррозионного разрушения алюминиевого сплава в зоне контакта с титаном составляет в случае неподвижной морской воды 3,30, в случае проточной — 1,38. Как видно из этих данных, в присутствии титана корродирование алюминия заметно интенсифицируется, хотя и не в столь значительной мере.

Существенное различие прочностных свойств титана и алюминия может повлечь формирование в зоне разнородного контакта высоких растягивающих остаточных сварочных напряжений. Это в свою очередь приводит к усилению коррозионных явлений (стресс-коррозия) вплоть до возможного коррозионного развития поверхностных трещиноподобных дефектов [21].

Одним из наиболее эффективных путей защиты конструктивных элементов от вредного воздействия агрессивной среды является нанесение на поверхность разнородной детали различных защитных покрытий [22]. Кроме того, для снижения уровня остаточных сварочных напряжений сварное соединение может быть подвергнуто соответствующей термообработке.

Поскольку в процессе сваркопайки происходит плавление алюминия, то при значительных пластических деформациях при остывании в температурном интервале хрупкости могут возникать горячие трещины в алюминиевой части разнородного изделия. Для снижения риска появления подобного рода нежелательных дефектов необходима соответствующая оптимизация технологического цикла сварки. Выбор алюминиевого сплава разнородного изделия и присадочного материала должен определяться не только требованиями к механическим и физико-химическим свойствам, но и максимальной стойкостью против горячего трещинообразования [23, 24].

Еще одним возможным дефектом сварнопаяных титан-алюминиевых соединений является наличие оксидных плен, которые конвекционными потоками в жидком металле с поверхности расплавленного алюминия заносятся в металл шва и впоследствии там кристаллизуются [25]. Наличие таких неметаллических включений может негативно повлиять на эксплуатационные свойства сварной конструкции при их значительных геометрических размерах. Поэтому при сварке плавлением алюминия рекомендуется обеспечивать интенсивное перемешивание ванны жидкого металла с целью механического разрушения, измельчения и равномерного распределения оксидных плен в объеме металла [26].

Как видно из таблицы, температурные коэффициенты титана и алюминия отличаются в несколько раз. В таком случае при сварке протяженных тонкостенных деталей из этих металлов (в частности, листов или тонких пластин), можно

ожидать появления относительного смещения их кромок и дополнительных изгибных деформаций [2, 27]. Остаточное деформированное состояние может быть снижено либо за счет оптимизации сварочного процесса, учитывающей существенное деформирование конструкции, либо за счет последующей термической или механической обработки.

При эксплуатации подобных сварных соединений при переменных температурах (даже в случае равномерного нагрева-охлаждения) вследствие различной кинетики поля деформаций в алюминиевой и титановой частях изделия в области разнородного стыка могут формироваться дополнительные напряжения. Если остаточные сварные напряжения в соединении велики, то такая дополнительная нагрузка существенно снижает ресурс безопасной эксплуатации подобной конструкции. Для уменьшения влияния этого эффекта на эксплуатационные качества конструкции необходимо проведение мероприятий по снижению уровня остаточных сварочных напряжений, в частности, применение различных видов термообработки.

1. *Characterization and properties of dissimilar metal combinations of Fe-Al and Ti-Al-sheet materials* / F. Wagner, I. Zerner, M. Kreimeyer et al. // Proc. ICALEO, Orlando, Florida, USA, Sept., 2001. — Orlando: LIA Congress Proc., 2001. — P. 365-374.
2. *Schumacher J.* Einfluss von Werkstoff- und Prozessparametern auf laserstrahlgefuegte Mischverbindungen aus Titan und Aluminium. Diplomarbeit. — Bremen: BIAS-Verl., 2005. — 93 S.
3. *Mai T. A., Spowage A. C.* Characterisation of dissimilar joints in laser welding of steel-kovar, copper-steel and copper-aluminium // Mater. Sci. and Eng. A. — 2004. — № 374. — P. 224-233.
4. *Рабкин Д. М., Рябов В. Р., Гуревич С. М.* Сварка разнородных материалов. — Киев: Техніка, 1975. — 206 с.
5. *Рябов В. Р.* Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами. — Киев: Наук. думка, 1983. — 264 с.
6. *Лихтман В. В., Щукин Е. Д., Ребиндер А. П.* Физико-химическая механика металлов. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 363 с.
7. *Цвиккер У.* Титан и его сплавы. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.
8. *Алюминий: свойства и металловедение* / Под ред. Дж. Е. Хэтча. — М.: Металлургия, 1989. — 422 с.
9. *Kreimer M., Vollertsen F.* Processing titanium-aluminum hybrid joints for aircraft applications // Proc. of the Third Intern. WLT-conf. on lasers in manufacturing, Munich, June, 2005. — Munich, 2005. — P. 238-243.
10. *Сабокаръ В. К., Залков В. Н., Куреев Л. С.* Особенности аргоно-дуговой и диффузионной сварки титана с алюминием // Автомат. сварка. — 1998. — № 1. — С. 14-17.
11. *Beeinflussung der Bildung intermetallischer Phasen beim Laserfuegen von Werkstoffkombinationen durch gezielte Nutzung kurzzeitmetallurgischer Effekte* / T. Pretorius, M. Kreimeyer, I. Zerner et al. // Kurzzeitmetallurgie. — Bremen: BIAS-Verl., 2002. — S. 23-32.
12. *Ziegelheim J., Hiraki S., Ohsawa H.* Diffusion bondability of similar/dissimilar light metal sheets // J. Mater. Proc. Technol. — 2007. — № 186. — P. 87-93.
13. *Kahraman N., Gulenc B., Findik F.* Corrosion and mechanical-microstructural aspects of dissimilar joints of Ti-6Al-4V and Al plates // Intern. J. Impact Eng. — 2007. — № 34. — P. 1423-1432.

14. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* / Под ред. В. Н. Замкова. — Киев: Наук. думка, 1986. — 240 с.
15. *Нестеров А. Ф., Гордо В. П., Плышевский М. И.* Особенности выполнения телескопических титан-алюминиевых сварнопаяных соединений // *Свароч. пр-во.* — 1986. — № 12. — С. 10–11.
16. *Лариков Л. П., Рябов В. Р., Фальченко В. М.* Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке. — М.: Машиностроение, 1975. — 140 с.
17. *Dybko V. I.* Reaction diffusion and solid state chemical kinetics. — Kyiv: IPMS, 2002. — 297 p.
18. *Welding handbook: Materials and application* / Ed. W. R. Oates, A. M. Saitta. — Miami: AWS, 1998. — Vol. 4, pt. 2. — 621 S.
19. *Verbrugge M.* Galvanic corrosion over a semi-infinite, planar surface // *Corros. Sci.* — 2006. — № 48. — P. 3489–3512.
20. *Титановые сплавы в машиностроении* / Под ред. Г. И. Капырина. — Л.: Машиностроение, 1977. — 248 с.
21. *Joseph A., Rai S. K., Jayakumar T.* Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints // *Intern. J. Pressure Vessels and Piping.* — 2005. — № 82. — P. 700–705.
22. *BIAS Jahresbericht 2004* / Ed. F. Vollersten, K. Partes. — Bremen: BIAS-Verl., 2005. — 45 S.
23. *Прохоров Н. Н.* Физические процессы в металлах при сварке. — В 2 т. — Т. 2. — М.: Metallurgiya, 1976. — 600 с.
24. *Nakata K., Matsuda F.* Evaluations of ductility characteristics and cracking susceptibility of Al alloys during welding // *Trans. JWRI.* — 1995. — № 1. — P. 83–94.
25. *Покляцкий А. Г., Лозовская А. В., Гринюк А. А.* Предотвращение образования оксидных плен в швах при сварке литий содержащих алюминиевых сплавов // *Автомат. сварка.* — 2002. — № 12. — С. 45–48.
26. *Покляцкий А. Г.* Особенности образования макровключений оксидной пленки в металле швов алюминиевых сплавов // Там же. — 2001. — № 3. — С. 38–40.
27. *Махненко В. И., Миленин А. С., Семенов А. П.* Математическое моделирование термомеханических процессов при сваркопайке стыковых соединений типа титан-алюминий // Там же. — 2007. — № 11. — С. 5–9.

Analysis of key problems, arising in braze welding of dissimilar joints of titanium and aluminium has been performed. Regularities of the processes determining the performance of dissimilar structures are shown. Recommendations on optimization of technological processes are given, which allow producing sound titanium-aluminium braze-welded components.

Поступила в редакцию 15.10.2007

## Журналу «Сварщик» — 10 лет

В сегодняшнем мире печатных изданий техническим журналам отведено более чем скромное место. Но среди специализированных изданий инженерно-технические работники могут найти интересный, полезный, привлекательный журнал по сварке — это информационно-технический журнал «Сварщик», который в апреле 2008 г. отмечает свое 10-летие. На первый взгляд, 10 лет — возраст незначительный, но 60 номеров, увидевших свет, для журнала убедительная победа. За это время удалось решить одну из наболевших проблем сварочного производства, развивающегося в условиях рыночной экономики, — восполнить информационный дефицит. Сегодня «Сварщик» является надежным и авторитетным источником актуальной и полезной информации для сотен специалистов.

Отличительная особенность издания состоит в высокой требовательности и профессиональном подходе редколлегии и редакции к публикуемым материалам, корректность в отношении с авторами, умение донести до читателя полезные знания и опыт, рассказать о достижениях разработчиков, производителей, обозначить ориентиры для потребителей сварочной техники и технологий.

За прошедшие годы журнал значительно расширил тематику публикуемых материалов и охватил все многообразие современного сварочного производства.

Каждый номер «Сварщика» — это «настольная книга» для широкого круга специалистов технических, экономических, снабженческих подразделений промышленных предприятий.

Особенно следует отметить усилия коллектива журнала, направленные на расширение географии распространения издания. С 2003 г. в Минске издан журнал «Сварщик в Белоруссии», а с 2006 г. в Москве выпускается «Сварщик в России». Журнал «Сварщик» знаком специалистам Латвии, Польши, Словакии, Болгарии, Словении благодаря установлению творческих контактов с коллегами и сотрудничеству. Общества сварщиков Украины с ассоциациями сварщиков этих стран. Таким образом, усилиями журнала «Сварщик» созданы условия для развития единого информационного пространства для специалистов сварочного производства разных стран.