

УДК 621.791.12; 621.791.4;
669.017.3; 669.017.3:620.18

Получение неразъемных соединений сплавов на основе алюминия и титана

Рафальский И.В., Немененок Б.М., Луцкич П.И.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация:

Представлены представлены данные аналитического характера на основе имеющихся в открытой печати материалов, содержащих результаты экспериментальных исследований процессов сварки трением с перемешиванием разнородных материалов на основе алюминия и титана. Обсуждаются особенности эволюции микроструктуры соединений разнородных материалов на основе сплавов алюминия и титана, полученных в процессе сварки трением с перемешиванием (СТП) разнородных материалов на основе алюминия и титана.

Текст доклада:

За последние несколько лет развитие производственных технологий привели к широкому использованию инновационных материалов в различных отраслях промышленности. Наиболее используемыми материалами являются легкие сплавы, применяемые в автомобильной и аэрокосмической областях, благодаря высоким относительным показателям механических и эксплуатационных свойств. Такие материалы, как алюминиевые и титановые сплавы, позволяют создавать легкие и прочные конструкции, что в транспортной отрасли приводит к значительному снижению расхода топлива и благоприятному воздействию на окружающую среду. Однако такие сплавы, как правило, менее пригодны для обработки по сравнению с традиционно используемыми сталями, в том числе из-за трудностей получения неразъемных соединений методами сварки или пайки [1].

Для получения соединений разнородных материалов на основе алюминия и титана в последние годы активно исследуются возможности твердофазных методов сварки, прежде всего, сварки трением с перемешиванием (СТП). Соединение листов из титанового сплава TiAl6V4 и алюминия AA2024-T3 этим методом было исследовано в работе [2]. Исследования микроструктуры стыкового соединения показали, что в структуре сварного шва рядом с поверхностью раздела титан-алюминий (на стороне титана) наблюдалась смесь мелких рекристаллизованных зерен алюминиевого сплава и частиц титана. Было также установлено резкое снижение твердости на границе раздела титан/алюминий (на стороне алюминия), что сви-

детельствует о существенных микроструктурных изменениях после СТП. Предел прочности соединения при растяжении при этом достиг 73% прочности от базового материала (алюминиевого сплава), с разрывом на границе раздела титана и алюминия.

Результаты исследований микроструктуры и характеристик границы раздела соединений из титана (использовались чистый титан и сплав Ti-6Al-4V) и алюминиевых сплавов на основе систем Al-Cu-Mg, Al-Mg-Cu-Zn (использовались алюминиевые пластины 2024-T3 и 7075-T651) представлены в работе [3]. Основной задачей исследования являлось изучение твердофазных реакций легирующих элементов сплавов при стыковом соединении СТП материалов. Средняя прочность на растяжение соединения Ti/2024 составила 311 МПа, при этом прочность на разрыв соединения Ti/2024 была выше, чем прочность соединения Ti/7075 при аналогичных параметрах СТП-процесса. Выполненные исследования показали, что при испытаниях на прочность разрушение соединений, в основном, наблюдались в той области, где имелся слой интерметаллического соединения TiAl₃. Например, дефекты структуры были обнаружены в сварном соединении Ti-6Al-4V/7075, полученном при скорости перемещения рабочего инструмента 300 мм/мин.

Результаты механических испытаний показали, что средняя прочность на растяжение соединений сплавов Ti-6Al-4V с алюминиевыми сплавами ниже, чем прочность соединений Ti/Al, полученных при одних и тех же параметрах СТП. Средняя прочность на растяжение соединений сплавов Ti-6Al-4V/2024 выше, чем прочность соединений сплавов Ti-6Al-4V/7075. Во всех соединениях из сплавов на основе Ti и Al разрушение соединений наблюдалось вблизи границы раздела. Средняя прочность на разрыв соединения Ti/2024 составила 311 МПа, а прочность на разрыв соединения Ti/7075 составляла 201 МПа при скорости движения рабочего инструмента 300 мм/мин. Средняя прочность на разрыв соединения Ti/7075 ниже, чем прочность соединения Ti/2024 при всех исследованных параметрах сварки трением с перемешиванием. При увеличении скорости движения инструмента предел прочности соединений увеличивался.

Исследования микроструктуры и свойств сварных швов соединений, полученных с использованием технически чистого титана и алюминиевого сплава ADC12 на основе системы Al-Si-Cu с использованием технологии СТП, показали, что на границе раздела разнородных металлов образовалась интерметаллическая фаза TiAl₃ [4]. Основными использованными материалами являлись листы из алюминиевого сплава ADC12 (толщиной 4 мм) и технически чистого титана (толщиной 2 мм). При скорости сварки 60 мм/мин штифт внедряется в нижний лист титана, так как происходит

существенное размягчение верхнего алюминиевого листа в процессе сварки, при этом металлический Ti частично захватывался в зону перемешивания. При извлечении штифта металлический Ti частично деформировался и захватывался в сторону листа алюминиевого сплава по краям штифта. При увеличении скорости перемещения инструмента до 90 мм/мин штифт не касался поверхности нижнего листа титана, поскольку предотвращалось существенное размягчение алюминиевого листа. Листы титана и алюминиевого сплава были плотно соединены, характеристики микроструктуры сварного шва на стороне алюминиевого сплава аналогичны характеристикам самого алюминиевого сплава.

Ключевым фактором, обеспечивающим качество сварного шва в процессе СТП материалов на основе алюминия и титана, является образование интерметаллических фаз. Анализ фазовой диаграммы Al-Ti показывает, что в этой системе могут образовываться несколько интерметаллических соединений, в том числе Ti_3Al , $TiAl$, $TiAl_2$, Ti_2Al_5 и $TiAl_3$. Однако результаты рентгеноструктурного анализа показали, что фаза $TiAl_3$ являлась единственным интерметаллическим продуктом реакции в проведенном эксперименте. Как указывается в работе [4], эти результаты хорошо согласуются с термодинамическими расчетами, которые показывают, что $TiAl_3$ имеет самую низкую свободную энергию образования среди соединений $TiAl_3$, $TiAl$ и Ti_3Al . Образование $TiAl_2$ и Ti_2Al_5 осуществляется в результате протекания серии твердофазных и/или твердо-жидкофазных реакций, в которых соединение $TiAl$ является одной из исходных фаз. Более того, фаза $TiAl_3$ является единственной интерметаллической фазой, образующейся при температуре реакции ниже температуры плавления алюминия. При этом было установлено, что образование $TiAl_3$ сильно зависит от скорости перемещения инструмента (тепловыделения) в процессе СТП и, следовательно, существенно влияет на механические свойства соединений. Максимальная разрушающая нагрузка исследованных соединений достигала 62% алюминиевого сплава с образованием трещин на границе раздела сплавов.

Выполнены исследования микроструктуры и свойств (твердость) соединений технически чистого титана и алюминиевого сплава 5083 (на основе системы Al-Mg-Mn), полученных в конфигурации стыкового соединения сваркой трением с перемешиванием при скорости вращения рабочего инструмента 1120 об/мин и скорости перемещения 50 мм/мин [5]. Полученные результаты показали, что в зоне перемешивания существуют три структурные области: основного алюминиевого сплава, основного металла титана и область, состоящая из интерметаллических соединений алюминия и титана. При этом область соединения на стороне алюминиевого сплава

состоит из зоны перемешивания, зоны термомеханического воздействия и зоны термического влияния, в то время как область соединения на стороне титана включает зону перемешивания и зону термического влияния. Самая высокая твердость (480 HV) была получена в зоне перемешивания, что связано с чрезмерной пластической деформацией и образованием интерметаллических соединений.

Оценка твердости и исследования микроструктуры методом сканирующей электронной микроскопии соединений коммерчески чистого титана и алюминиевого сплава 7075, полученных сваркой трением с перемешиванием встык при скорости вращения рабочего инструмента 1120 об/мин и скорости перемещения 50 мм/мин проводилась в работе [6]. Фазы в области сварного шва идентифицированы с использованием методов дифракции рентгеновских лучей и дисперсионной рентгеновской спектроскопии. Установлено, что зона сварки имела коническую форму и состояла из частиц алюминия и титана, состав и структура которых определяла твердость и прочность на разрыв сварного шва. В области сварного шва наблюдали три зоны, а именно зону основного металла титана, зону основного металла алюминия и зону смешанного соединения интерметаллидов с титаном и алюминием. Также было отмечено, что область соединения на стороне алюминиевого сплава включала зону перемешивания, зону термомеханического воздействия и зону термического влияния, в то время как область соединения на стороне титана содержит зону перемешивания и зону термического влияния. Значение твердости области сварного шва составляло около 360 HV, что означало, что в области сварного шва, по сравнению с основным металлом из титана и алюминия, твердость увеличилась на 6% и 20%, соответственно, в результате пластической деформации и образования интерметаллических соединений титана и алюминия.

Результаты исследований микроструктуры сварных швов соединений, полученных в СТП-процессах сплавов на основе алюминиевого сплава Al6060 и сплава на основе титана Ti-6Al-4V (Ti64) при сварке листовых материалов внахлест, показали, что структура и свойства в области сварного шва существенно зависят от параметров расположения рабочего инструмента, связанных с позиционированием штифта [7].

Выполнено исследование влияния параметров СТП, в том числе положения штифта, скорости вращения и скорости перемещения инструмента, на образование дефектов и свойства соединений (проведены испытания на растяжение) из титанового сплава TC4 и алюминиевого сплава 6061 [8]. Установлено, что при оптимальных параметрах СТП прочность соединений могла достигать 68% от прочности основного алюминиевого сплава.

Исследование соединений, полученных из листовых материалов толщиной 3,5 мм на основе алюминиевого сплава Al6061-T6 и сплава титана Ti-6%Al-4%V, сваркой трением с перемешиванием выполнено в работе [9]. Параметры СТП-процесса: диаметр плеча инструмента 18 мм, диаметр штифта 5 мм, длина штифта инструмента 3,3 мм, скорость вращения инструмента 300–450 об/мин, скорость перемещения инструмента 1,0–1,4 мм/с, угол наклона инструмента 3°. Установлено, что предел прочности при растяжении сварных швов составлял приблизительно 91% от прочности основного металла из алюминиевого сплава, что было на 24% выше, чем у сварных швов из наплавленного сплава (GTAW) при тех же параметрах соединений. Пластичное разрушение было основным видом разрушения при испытании на растяжение сварных швов.

При исследовании СТП-процессов соединения разнородных материалов на основе алюминия и титана (сплав титана TC1 и алюминиевый сплав LF6) установлено, что с увеличением скорости перемещения инструмента или с уменьшением его скорости вращения количество частиц сплава Ti, замешиваемых в зону сварного шва, уменьшается [10]. При этом с увеличением скорости перемещения разрушающие нагрузки на стыковые соединения уменьшаются, а наибольшее значение достигается при скорости сварки 60 мм/мин и скорости вращения инструмента 1500 об/мин.

Из анализа публикаций по сварке СТП можно сделать вывод, что прочность сварных швов из разнородных металлов, в основном, определяется природой и распределением интерметаллидов. Для улучшения механических характеристик шва толщина слоя интерметаллических соединений должна быть ограничена размером около 1 мкм, которая возрастает с увеличением количества подводимой теплоты. Наибольшее влияние на количество подводимой теплоты оказывает скорость вращения инструмента [11].

Таким образом, в настоящее время СТП является наиболее актуальным и востребованным процессом при создании изделий из разнородных конструкционных материалов на основе алюминия и титана, ограниченно свариваемых или не свариваемых сваркой плавлением. Основное внимание исследователей направлено на изучение процесса СТП, обеспечивающего минимизацию возможных дефектов, вызванных неправильными параметрами процесса сварки. Изучены различные параметры процесса, такие как скорость подачи, скорость вращения инструмента, угол наклона, глубина погружения и относительное положение инструмента и кромок свариваемых материалов, исследовано влияние геометрии инструмента. Установлено, что геометрия инструмента имеет решающее значение для правиль-

ного формирования потока пластифицированного материала и увеличения прочности на растяжение сварного соединения.

Выводы

1. Алюминиевые сплавы на основе систем Al-Cu, Al-Si-Cu, Al-Mg-Mn, Al-Cu-Mg, Al-Mg-Cu-Zn можно успешно сваривать встык и внахлест, используя технологию сварки трением с перемешиванием. Максимальная разрушающая нагрузка на стыковые соединения может достигать 62% и выше по сравнению с основным металлом из сплава алюминиевого сплава.

2. Интерметаллическая фаза $TiAl_3$ может образовываться на границе раздела в результате диффузионной реакции Al-Ti при определенных условиях СТП-процесса.

3. В СТП-процессе между алюминиевым сплавом и титаном область соединения на стороне алюминия состоит из зоны перемешивания, зоны термомеханического воздействия и зоны термического влияния, а область соединения на стороне титана включает зону перемешивания и зону термического влияния. Отсутствие зоны термомеханического воздействия обусловлено низкой теплопроводностью титана.

4. В зоне перемешивания микроструктура сварного шва состоит из трех областей: области основного алюминиевого сплава, области основного металла титана и области, состоящей из интерметаллидов алюминия и титана.

5. Скорости перемещения (подачи) и вращения рабочего инструмента, а также параметры его позиционирования в СТП-процессах существенно влияют на структуру и механические свойства (прочность, твердость, относительное удлинение) соединений, полученных из разнородных сплавов на основе алюминия и титана. Изменение механических свойств сварного шва связано с пластической деформацией в зоне перемешивания и образованием интерметаллических соединений алюминия и титана, которые, в основном, представляют собой фазы $AlTi_3$, $AlTi_2$ и Al_2Ti .

Работа выполнена при поддержке Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований, проект Т19ИНДГ-007 «Исследование межфазного взаимодействия и формирования структуры зерна в швах, полученных сваркой трением, для различных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов с титановыми сплавами».

Литература

1. Fabrizio Micari. Friction Stir Welding as an effective alternative technique for light structural alloys mixed joints / Fabrizio Micari, Gianluca Buffa,

S. Pellegrino, Livan Fratini // 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. – *Procedia Engineering* 81 (2014). – pp. 74 – 83.

2. Ulrike Dressler. Friction stir welding of titanium alloy TiAl6V4 to aluminium alloy AA2024-T3 / Ulrike Dressler, Gerhard Biallas, Ulises Alfaro Mercado // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – Vol. 526, Issue 1–2, 25. – pp. 113–117.

3. Masayuki Aonuma. Dissimilar Metal Joining of 2024 and 7075 Aluminium Alloys to Titanium Alloys by Friction Stir Welding / Masayuki Aonuma, Kazuhiro Nakata // *Materials Transactions*. – 2011. – Vol. 52, No. 5. – pp. 948–952.

4. Chen, Y.C. Microstructural characterization and mechanical properties in friction stir welding of aluminum and titanium dissimilar alloys / Y.C. Chen, K. Nakata // *Materials and Design*. – 2009. – Vol. 30. – pp. 469–474.

5. Sadeghi-Ghogheri, M. Friction stir welding of dissimilar joint of aluminium alloy 5083 and commercially pure titanium / M. Sadeghi-Ghogheri, M. Kasiri-Asgarani, K. Amini // *Kovove Mater*. – 2016. – Vol. 54 – pp. 71–75.

6. Sadeghi-Ghogheri, M. Friction stir welding of dissimilar joints between commercially pure titanium alloy and 7075 aluminium alloy / M. Sadeghi-Ghogheri, M. Kasiri-Asgarani, K. Amini // *Transactions of Famena*. – 2017. – Vol. XLI-1. – pp. 81–90.

7. Z.W.Chen. Microstructures in interface region and mechanical behaviours of friction stir lap Al6060 to Ti–6Al–4V welds / Z.W.Chen, S.Yazdani // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 634. – pp. 37–45.

8. A.P.Wu. Defects and the properties of the dissimilar materials FSW joints of titanium alloy TC4 with aluminum alloy 6061 / A.P.Wu, Z.H.Song, K.Nakata, J.S.Liao // *Proceedings of the 1st International Joint Symposium on Joining and Welding*. – Osaka, Japan, 6–8 November 2013. – pp. 243–248.

9. HanSur Bang. Joint properties of dissimilar Al6061-T6 aluminum alloy/Ti–6%Al–4%V titanium alloy by gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding / HanSur Bang, HeeSeon Bang, HyunJong Song, SungMin Joo // *Materials and Design*. – 2013. – Vol. 51. – pp. 544–551.

10. Yu-hua Chen. Interface characteristic of friction stir welding lap joints of Ti/Al dissimilar alloys / Yu-hua Chen, Quan NI, Li-ming KE // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2012. – Vol. 22, Issue 2. – pp. 299–304.

11. Buffa, G. Dissimilar titanium/aluminum friction stir welding lap joints by experiments and numerical simulation / G. Buffa, M. De Lisi, E. Sciortino, L. Fratini // *Advances in Manufacturing*. – 2016. - Issue 4. – pp. 287– 295.