

УДК 621.791.14

**СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ТИТАНОВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

С.А. Ермакова, А.А. Елисеев

Научный руководитель: д.т.н. Колубаев Е.А.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Россия, г. Томск, Академический пр., 2/4, 634055

E-mail: sae@ispms.tsc.ru

FRICION STIR WELDING TI-AL ALLOYS WITH ULTRASONIC IMPACT

S.A. Ermakova, A.A. Eliseev

Scientific adviser: Dr. Kolubaev E.A.

Institute for Physics of Strength and Material Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,

Russia, Tomsk, 2/4 Akademicheskii ave., 634055

E-mail: sae@ispms.tsc.ru

***Abstract.** High performance and reduced weight and cost are gaining importance in the aviation industry. There are different approaches to meet these requirements. In this study, titanium and aluminum alloys were welded using friction stir welding. The samples were divided into two groups, one of which was welded using ultrasound. Studies have shown that the strength of samples is influenced by many factors that are usually not taken into account. For example, the complexity of the interface between dissimilar materials and its roughness. It was found that the application of ultrasound during welding often increases the complexity of the interface and decreases its roughness, which generally leads to strengthening. This effect can neutralize the increase in the volume fraction of intermetallic compounds during the intensification of the welding process. The final strength consists of the number of defects, the volume fraction of intermetallics and the complexity of the interface.*

Введение. Для аэрокосмической отрасли особо остро стоит вопрос получения биметаллов титан-алюминий, поскольку традиционные плавящие способы сварки не позволяют получать качественные сварные соединения из этих материалов из-за значительных различий в их характеристиках [1]. В полученных швах образуется слой хрупких интерметаллидов, разупрочняющих соединение, и высокие напряжения на границе раздела [2]. Одна из возможностей соединения сплавов металлов титан-алюминий – это сварка трением с перемешиванием (СТП), которая происходит без плавления материала.

Ранее уже исследовались сварные швы титан-алюминий, полученные с помощью стыковой СТП и СТП внахлест через алюминий [3]. На границе раздела образуется слой интерметаллидов меньшей толщины, чем при плавящей сварке, а соединение представляет собой механическую смесь, которая тем прочнее, чем сильнее развита поверхность раздела [4]. С точки зрения развития поверхности раздела, нахлесточная сварка через титан может быть более успешна. При сварке через алюминий снижение скорости подачи для развития поверхности может вызвать перегрев алюминия, что приведет к его удалению из шва и росту интерметаллидов [5]. При сварке через титан данных проблем можно будет избежать, в виду его меньшей теплопроводности. В предыдущем исследовании [6] было обнаружено, что

уменьшение скорости подачи приводит к уменьшению дефектов и развитию поверхности раздела. Эти эффекты в совокупности способствовали увеличению прочности соединения в целом.

Ввод ультразвуковой вибрации при СТП может интенсифицировать пластическое течение материала вокруг сварочного инструмента и улучшить качество соединения. СТП соединение является механической смесью, поэтому наиболее важным для разнородных материалов является развитие поверхности раздела, чему может способствовать ультразвук. Данная работа направлена на разработку и подтверждение данных представлений.

Экспериментальная часть. Биметаллы производились сваркой трением с перемешиванием из листового проката алюминиевого сплава АМг5 толщиной 2,5 и титанового сплава ВТ1-0 толщиной 2,5 мм. Сварка трением с перемешиванием в среде аргона осуществлялась внахлест со стороны титана. Для сварки использовался инструмент из жаропрочного сплава ЖС6У с длиной пина 2,8 мм. Частота вращения инструмента варьировалась в диапазоне 950–1100 об/мин, скорость подачи – 90–100 мм/мин, аксиальная нагрузка на инструмент – 800–900 кг. Сварка осуществлялась с ультразвуком и без него. Приложение ультразвукового воздействия к заготовке осуществлялось посредством жесткого закрепления магнитострикционного преобразователя на свободном крае заготовки из титанового сплава. Частота ультразвука являлась резонансной и составляла 21,6 КГц. Мощность ультразвукового воздействия – 0,9 кВт.

Структура шва исследовалась с применением оптической световой и растровой электронной микроскопии. Для выявления механических свойств полученных соединений проводились механические испытания на растяжение. Для выявления фазовой структуры использовался растровый электронный микроскоп Microtrac SM-3000. Для выявления зеренной структуры использовался металлографический микроскоп Altami MET-1S, образцы предварительно подвергались химическому травлению. Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре ДРОН-7.

Результаты. Полученные соединения имеют типичную структуру зоны перемешивания, которая повторяет геометрию сварочного инструмента (рис. 1). Зоны термомеханического воздействия и термического влияния визуально почти отсутствуют, что также свойственно сварке трением с перемешиванием титана. В качестве критериев для оценки макроструктуры в данной работе выбраны ширина шва, глубина погружения верхнего листа в нижний, сложность границы раздела, суммарная площадь дефектов, шероховатость границы раздела и прочность. Обнаружено, что при воздействии ультразвука в процессе сварки увеличивается сложность границы раздела и уменьшается ее шероховатость, что приводит к упрочнению (рис. 2). Наибольшая прочность составила 85% от прочности исходного материала. Фрактографический анализ показал, что разрушение происходило как по алюминию, так и по титану и по интерметаллидам. Рентгеноструктурный анализ показал, что ультразвуковое воздействие может как увеличивать объемную долю интерметаллидов, так и уменьшать её. Также ультразвук в большинстве случаев позволил уменьшить количество дефектов.

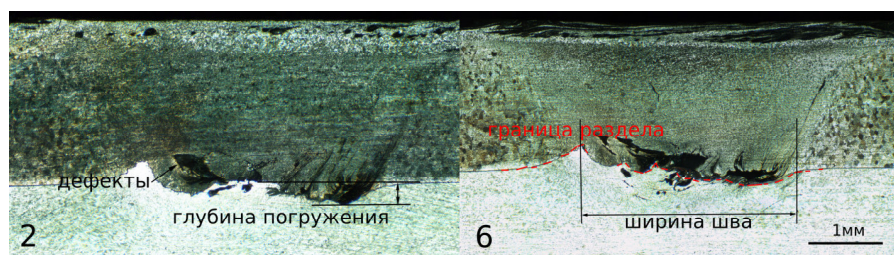


Рис. 1. Оптическое изображение образцов (2 – СТП, 6 – СТПУЗ)

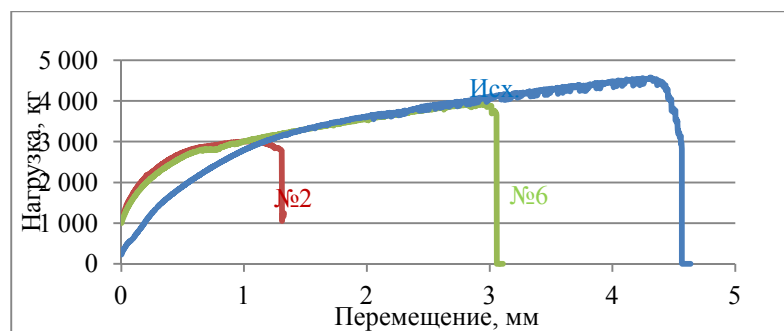


Рис. 2. Диаграмма «нагрузка-перемещение» механических испытаний титан-алюминиевых биметаллов, полученных сваркой трением с перемешиванием (2 – СТП, 6 – СТПУЗ)

Заключение. Как показали исследования, на прочность образцов влияет очень много факторов, которые обычно не принимаются во внимание. Например, сложность границы раздела разнородных материалов и её шероховатость. Обнаружено, что приложение ультразвука в процессе сварки часто увеличивает сложность границы раздела и уменьшает её шероховатость, что в целом приводит к упрочнению. Этот эффект может нивелировать увеличение объемной доли интерметаллидов при интенсификации процесса сварки. При этом между разнородными материалами не наблюдалось непрерывной прослойки интерметаллидов. Разрушение происходило как по алюминию, так и по титану и по интерметаллидам. Итоговая прочность складывается из количества дефектов, объемной доли интерметаллидов и сложности границы раздела.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wildn J, Bergmann J.P. Manufacturing of titanium/aluminium and titanium/steel joints by means of diffusion welding. // *Welding and Cutting*. – 2004. – Vol. 3(5). – P. 285 – 290.
2. Kah P., Shrestha M., Martikainen J. Trends in Joining Dissimilar Metals by Welding // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 440. – P. 269–276.
3. Li B., Zhang Z., Shen Y., Hu W., Luo L. Dissimilar friction stir welding of Ti–6Al– 4V alloy and aluminum alloy employing a modified butt joint configuration: Influences of process variables on the weld interfaces and tensile properties // *Materials & Design*. – 2014. – Vol. 53. – P. 838– 848.
4. Choi J.-W., Liu H., Fujii H. Dissimilar friction stir welding of pure Ti and pure Al // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. Vol. 730. – P. 168–176.
5. Watanabe M., Feng K., Nakamura Y., and Kumai S. Growth Manner of Intermetallic Compound Layer Produced at Welding Interface of Friction Stir Spot Welded Aluminum/Steel Lap Joint // *Materials Transactions*. – 2011. – Vol. 52(5). – P. 953–959.
6. Ermakova S.A., Eliseev A.A., Rubtsov V.E. Effect of feed speed on the quality of titanium-aluminum bimetal produced by friction stir welding // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2167. – P. 020091.