

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ  
С УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЁМНЫХ  
СОЕДИНЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

А.А. Елисеев

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. А.В. Колубаев  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055  
E-mail: [alan@ispms.ru](mailto:alan@ispms.ru)

Известные на сегодняшний день высокопрочные алюминиевые сплавы космического назначения не позволяют использовать традиционную сварку для получения неразъемных соединений, что существенно ограничивает область их применения в космических аппаратах. Перспективным является применение сварки трением с перемешиванием (СТП) для создания конструкций из этих сплавов [1]. Состояние отрасли на данный момент таково, что данной технологией пока что нельзя добиться равнопрочных соединений из высокопрочных алюминиевых сплавов, поэтому предлагается модификация технологии ультразвуковым воздействием. Такая модификация позволит решить проблему производства надежных конструкций космического назначения из высокопрочных материалов. Технология сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием (СТП-УЗ) открывает новые направления развития космической промышленности, в частности, создание космических аппаратов нового поколения. Также технология открывает перспективы в области изучения физических принципов деформации материалов и её влияния на структуру. СТП основана на массопереносе в ходе пластической деформации нагретого трением до пластичного состояния материала [2]. Ультразвуковое воздействие в ходе СТП приводит к интенсификации процесса перемешивания, а также сложным образом влияет на микроструктуру и структурно-фазовое состояние материалов [3, 4].

На данный момент получены данные о влиянии ультразвукового воздействия на материал в процессе СТП-УЗ, расширены теоретические знания о совместности действия деформации и ультразвукового воздействия, определены эффекты и физические принципы, происходящие в ходе сварки, а также изготовлено оборудование для осуществления СТП-УЗ (Рис. 1). При помощи данного оборудования получены качественные неразъемные соединения из высокопрочных алюминиевых сплавов.



Рис. 1. Установка СТП-УЗ

В различных работах было установлено, что ультразвуковое воздействие может приводить как к упрочнению неразъемного соединения, так и к разупрочнению [3, 4]. Упрочнение неразъемного соединения в ходе СТП-УЗ связывается с акустопластическим эффектом, который является причиной интенсификации перемешивания, а также усиления деформационно-индуцированного растворения частиц стабильных вторичных фаз в стареющих алюминиевых сплавах [3]. Разупрочнение неразъемного соединения в ходе СТП-УЗ вызвано ультразвуковым старением, которое, напротив, является причиной выпадения стабильных частиц, отрицательно влияющих на прочность материала [5, 6]. Эти эффекты являются конкурирующими в процессе СТП-УЗ, и их решающая роль определяется технологическим режимом сварки. Кроме того, разупрочнение по причине эволюции структурно-фазового состояния может быть перевешено релаксацией остаточных напряжений под действием ультразвука, что приведет к суммарному упрочнению соединения. В целом влияние ультразвука признается благоприятным.

Дальнейшая работа предполагает продолжение углубленного изучения физических процессов, происходящих в ходе сварки, внедрение технологии в космическую промышленность для создания космических аппаратов нового поколения, а также исследование возможности применения технологии для получения неразъемных соединений из других перспективных материалов

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mishra R.S., De P.S, Kumar N. Friction stir welding and Processing. - Springer International Publishing Switzerland: Material Science Engineering, 2014. – 338 p.
2. Eliseev A. A., Kalashnikova T. A., Tarasov S. Yu., Rubtsov V. E., Fortuna S. V., Kolubaev E. A. Microstructure of Fixed Butt Joints Formed by Friction Stir Welding on 2024T3 Aluminum Alloy // Key Engineering Materials. – 2016. - vol. 683. – p. 203–208.
3. Eliseev A.A., Tarasov S. Yu., Fortuna S. V., Rubtsov V. E., Kalashnikova T. A. Effect of Ultrasonic Application during Friction Stir Welding on Microstructure and Properties of AA2024 Fixed Joints // Key Engineering Materials. – 2016. – vol. 683. – p. 227–231.
4. Amini S., Amiri M. R. Study of ultrasonic vibrations effect on friction stir welding // Int J Adv Manuf Technol. – 2014. – vol.73. – p. 127-135.
5. Bousquet E., Poulon-Quintin A., Puiggali M., Devos O., Touzet M., Relationship between microstructure, microhardness and corrosion sensitivity of an AA 2024-T3 friction stir welded joint // Corros. Sci. – 2011. – vol. 53. – p. 3026-3034.
6. Mondolfo L.F. Aluminum alloys: structure and properties. - London-Boston: Butterworth, 1976.