

## Процесс сварки трением с перемешиванием алюминиево-литиевого сплава 2195

*М.В. Поклонская*

*Донской государственный технический университет*

**Аннотация:** В данной статье рассмотрено изучение влияния параметров сварки трением с перемешиванием на механические и микроструктурные свойства AA2195-T0 и T8. В статье описываются результаты экспериментального исследования эволюции механических свойств и микроструктуры сварного соединения с трением с перемешиванием алюминиево-литиевого сплава 2195.

**Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием; параметры процесса; механические свойства; алюминиево-литиевый сплав.

### Введение

Хорошо известно, что добавление Li в алюминиевые сплавы обеспечивает привлекательное сочетание низкой плотности и высокого модуля упругости, которые полезны для легких конструкций аэрокосмических аппаратов [1]. Низкая плотность и хорошие механические свойства AA2195 позволяют успешно использовать их в сверхлегком топливном баке Space Shuttle (SLWT) с момента первого успешного полета в 1998 году. Однако гигроскопичность элемента Li вызывает пористость, растрескивание [3,4] и низкую эффективность соединения. Известно, что эти сплавы проявляют необычное явление растрескивания на границе плавления, которое связано с равноосной зоной зерен, образующейся по механизму затвердевания в сплавах, содержащих осадки Li и Zr. Это связано с тем, что комбинация Li и Cu в межфазной жидкости снижает эвтектическую температуру жидкости и является причиной проблемы горячего растрескивания. Поэтому сварка трением с перемешиванием в твердом состоянии предпочтительна, чтобы избежать образования трещин при затвердевании при соединении этого сплава [2].

## Описание исследования

Материал, использованный для этого исследования, получен из Constellium Global Aerospace, Франция. Две пластины были соединены встык с помощью устройства для сварки трением с перемешиванием и направление сварки было параллельно направлению прокатки с купонами 300 мм в длину и 100 мм в ширину. Толщина пластины составляет 7,6 мм. Диапазон параметров сварки составляет четыре скорости вращения (350, 400, 600 и 800 об/мин) и пять скоростей перемещения (120, 180, 240, 300 и 360 мм/мин). После сварки все образцы были проверены с помощью рентгенографии, и один с дефектами был отброшен [3]. Во время сварки распределение температуры в зоне сварки контролировалось с помощью 10 термопар типа К, которые были установлены на поверхности пластин на расстоянии 100 мм от точки начала сварки для измерения распределения температуры. На стороне продвижения расположены 3 термопары на расстоянии 100 мм от начала сварки, и каждые 3 термопары прикреплены на стороне продвижения и отступающей стороне, расположенной еще на 100 мм [4].

На рисунке 1 показана металлографическая микроструктура AA2195-T0 и AA2195-T8 с некоторыми осадками. Осадки обнаружены на границах зерен и внутри зерна для AA2195-T8, а границы зерен не видны четко для AA2195-T0. Осадки легко образуются на границах усиления, поскольку высокая плотность дислокаций подходит для диффузии растворенных элементов на границах зерен.

Поскольку распределение температуры во время процесса FSW влияет на целостность сварного шва, температурный профиль измеряется в разных местах. На рисунке 2 показан результат измерения температуры. Одна пластина, направление вращения которой совпадает с направлением сварки, называется продвигающейся стороной (AS), а другая пластина, где вращение

инструмента противоположно направлению перемещения, обозначается как отступающая сторона (RS). При этом условии температура наступающей стороны на №4 увеличилась до 207°C, в то время как максимальная температура отступающей стороны на №7 составляла 203°C. Температура на наступающей стороне немного выше, чем на отступающей. В целом известно, что температура на стороне продвижения выше, чем на стороне отступления, поскольку поток материала вокруг инструмента перемещается от стороны продвижения к стороне отступления, дополнительно к теплу трения под выступом, что дает более высокую температуру. Это подтверждается измерением микротвердости зоны самородка в данном исследовании [5].

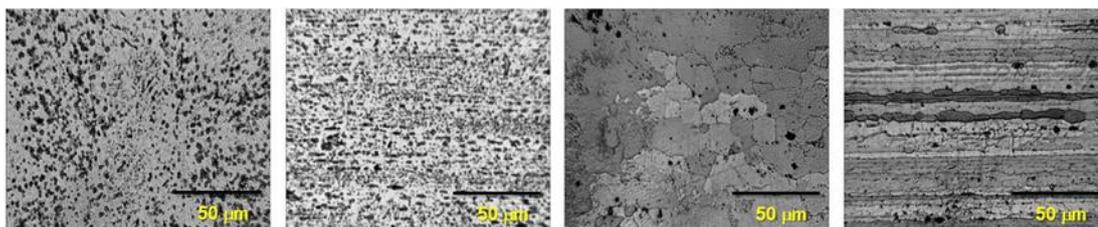


Рисунок 1 – Металлографы (а) продольного, (б) поперечного сечения AA2195-T0 и (в) продольного, (г) поперечного сечения AA2195-T8

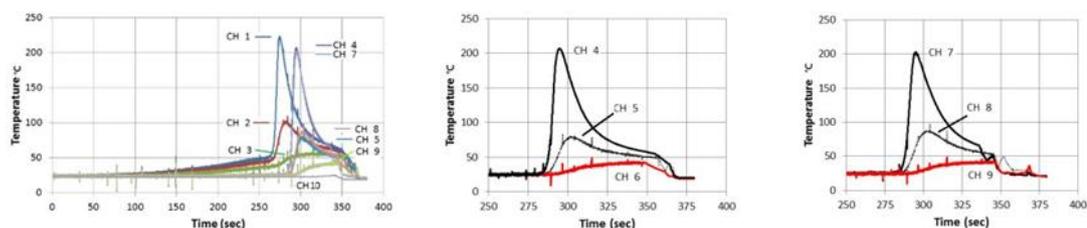


Рисунок 2. – Результат измерения температуры в разных местах, измеренный при сварке трением при 600 об/мин и 300 мм/мин

На рисунке 3 показаны результаты измерений микротвердости при сварке с перемешиванием трением при 600 об/мин с различной скоростью перемещения для AA2195-T0 и AA2195-T8. Микротвердость измеряется на

расстоянии 3,87 мм от поверхности и на расстоянии каждые 2 мм. Показано, что значения твердости тесно связаны с характером процесса, протекающего в зонах. Установлено, что твердость зоны самородка выше, чем у матрицы, из-за измельчения зерна во время сварки и охлаждения. Самая высокая твердость 124,3 Hv была получена для образца, сваренного со скоростью 300 мм/мин, и это связано с быстрым охлаждением при такой скорости перемещения. Это показывает, что минимальное значение микротвердости появляется на обоих концах ТМАЗ (Зона термомеханического воздействия) и НАЗ (Зона термического воздействия) для образца, сваренного со скоростью 180 мм/мин [6]. Это происходит из-за роста зерна в результате длительного воздействия тепла трения при низкой скорости перемещения и высокой силе трения на границе раздела. Минимальная твердость для AS составляет 110 Hv, в то время как для RS – 118 Hv, что подтверждает предыдущий аргумент о более высокой температуре для AS [7].

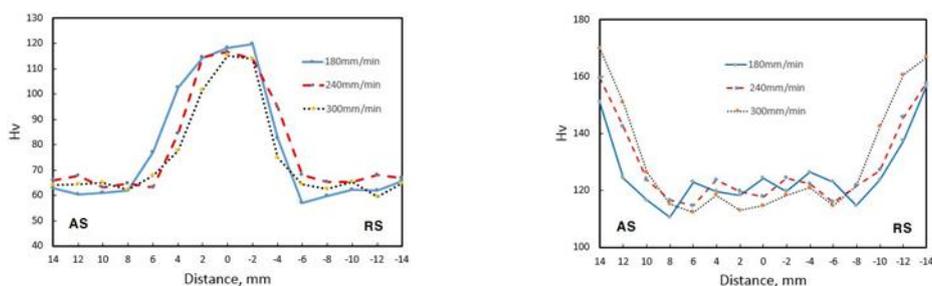


Рисунок 3. – Результат измерения микротвердости в зоне самородка, сваренного при 600 оборотах в минуту (а) AA2195-T0 и (б) AA2195-T8

Чтобы изучить влияние поверхностного оксида на целостность сварки, поверхность пластины обрабатывается для удаления поверхностного оксида. Известно, что присутствие оксида вредно, поскольку он может смешиваться в зоне перемешивания. Толщина пластины составляет 7,2 мм после удаления поверхностного оксида [8].

## Заключение

В этом исследовании были рассмотрены испытанные образцы FSW AA2195, соединенные встык. Микроструктура была охарактеризована с помощью электронной микроскопии, а во время сварки измерялись температуры поверхности. Показано, что температура на стороне продвижения выше, чем на стороне отступления, что подтверждает результаты профиля микротвердости в зоне самородка [9]. Для AA2195-T0 зона сварного шва может обладать более высокой микротвердостью, чем исходный материал, из-за перекристаллизации зерен, а профиль твердости внутри самородка зависит от скорости охлаждения. Для AA2195-T8 низкая твердость вокруг зоны самородка связана с растворением и укрупнением осадков при HAZ на стороне продвижения и/или отступающей стороне. Он показывает, что минимальное значение микротвердости отображается в месте, непосредственно прилегающем к наконечнику инструмента, рядом с поверхностью раздела HAZ. Влияние поверхностного оксида на прочность соединения при растяжении исследуется путем сравнения с образцом без поверхностного оксида. Показано, что эффект удаления оксида эффективен при относительно низких скоростях вращения 300 и 400 об/мин, в то время как в этом исследовании на образцы, сваренные с более высокой скоростью вращения, влияние незначительно. Технологическая карта сварки трением с перемешиванием этого сплава представляет прочность при каждом технологическом параметре, которым являются скорости вращения и перемещения [10].

## Литература

1. Ленивкин В.А., Киселёв Д.В., Софьянников В.А. Сварочные процессы и оборудование. Учебное пособие – Инфра-Инженерия, 2020, 308 с.
2. Николаев Г.А. Сварка в машиностроении – М.: Машиностроение, 1978, 504 с.
3. Савичев М.П., Бычков В.М., Медведев А.Ю., Супов А.В., Халиуллин Р.Р. Образование дефектов в процессе линейной сварки трением – Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2013, №6 (2) – Сс. 480-483.
4. Вилль В.И. Сварка металлов трением – Машиностроение, 1970, 176 с.
5. Черных И.К., Васильев Е.В., Дыльченко Р.В., Жданова Ю.Е., Игисенов Б.К. Особенности сварки разнородных металлов методом сварки трением с перемешиванием – Омский научный вестник, 2019 – Сс. 21-25.
6. Смоленский С.Ю., Поднозов В.Г. Формирование т-образных соединений при сварке трением – Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014, №5 (107) – Сс. 366-371.
7. Стаценко В.Н., Негода Е.Н., Сухорада А.Е. Анализ технологии сварки методом трения с перемешиванием – Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, 2017, №1 – Сс. 32-34.
8. Стаценко В.Н., Сухорада А.Е., Романова В.В. Тепловложение при точечной сварке трением с перемешиванием – Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета, 2018, №4 – Сс. 12-15.
9. Лебедев В.К., Черненко И.А., Вилль В.И. Сварка трением – Машиностроение, 1987, 240 с.
10. Курицин Д.В. Сварка трением перемешиванием – Машиностроение, 2013, 168 с.

## References

1. Lenivkin V.A., Kiselyov D.V., Sof'yannikov V.A. Svarochny`e processy` i oborudovanie. Uchebnoe posobie [Welding processes and equipment]. Infra-Inzheneriya, 2020, 308 p.
2. Nikolaev G.A. Svarka v mashinostroenii [Welding in mechanical engineering]. M.: Mashinostroenie, 1978, 504 p.
3. Savichev M.P., By`chkov V.M., Medvedev A.Yu., Supov A.V., Xaliullin R.R. Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, 2013, №6 (2), pp. 480-483.
4. Vill` V.I. Svarka metallov treniem [Friction welding of metals]. Mashinostroenie, 1970, 176 p.
5. Cherny`x I.K., Vasil`ev E.V., Dy`l`chenko R.V., Zhdanova Yu.E., Igisenov B.K. Omskij nauchny`j vestnik, 2019, pp. 21-25.
6. Smolenskij S.Yu., Podnozov V.G. Trudy` NGTU im. R. E. Alekseeva, 2014, №5 (107), pp. 366-371.
7. Stacenko V.N., Negoda E.N., Suxorada A.E. Vestnik Inzhenernoj shkoly` Dal`nevostochnogo federal`nogo universiteta, 2017, №1, pp. 32-34.
8. Stacenko V.N., Suxorada A.E., Romanova V.V. Vestnik Inzhenernoj shkoly` Dal`nevostochnogo federal`nogo universiteta, 2018, №4, pp. 12-15.
9. Lebedev V.K., Chernenko I.A., Vill` V.I. Svarka treniem [Friction welding]. Mashinostroenie, 1987, 240 p.
10. Kuricin D.V. Svarka treniem peremeshivaniem [Friction stir welding]. Mashinostroenie, 2013, 168 p.