

# СТРУКТУРА И ПРОЧНОСТЬ СВАРНОГО ШВА ЛИСТОВ СПЛАВА 1561 СОЕДИНЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Малофеев С. С., Никулин И. А.

*Белгородский государственный университет, Белгород, Россия*

[Malofeev@bsu.edu.ru](mailto:Malofeev@bsu.edu.ru)

[Nikulin\\_Ilya@bsu.edu.ru](mailto:Nikulin_Ilya@bsu.edu.ru)

## **Введение**

Алюминиевые сплавы используются в различных областях промышленности благодаря своей легкости, прочности и низкой стоимости. Широкое применение получили сплавы системы Al–Mg, к которым относится сплав марки 1561. Этот сплав обладает высокими коррозионными и механическими свойствами. Как правило, для изготовления неразъемных конструкций из сплава 1561 применяют аргонодуговую сварку. Данный метод может снижать прочность сварного соединения из-за дефектов, образующихся в зоне сварного шва. Поэтому создание равнопрочных конструкций из сплава 1561 представляется весьма актуальной задачей. В настоящее время в мире развивается новый способ сварки – сварка трением с перемешиванием, разработанная в Британском институте сварки. Этот способ имеет большой потенциал в плане создания равнопрочных соединений из алюминиевых сплавов [1]. При таком способе сварки сварочный инструмент раскручивается и внедряется в стык листов таким образом, что шип с резьбой проникает в глубь материала и перемешивает его, в то время как прижим и вращение плечиков обеспечивает разогрев и размягчение материала вокруг погруженного шипа. Известно, что сварные швы, полученные данным методом, обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными видами сварки: отсутствие горячих трещин и пористости, для сварки не требуется среды инертных газов, низкие требования к качеству поверхности свариваемых элементов, высокая скорость сварки и др. [2]. Целью данной работы являлось получение бездефектного сварного соединения листов сплава 1561, не уступающего по прочности листовым полуфабрикатам.

## **Материал и методы эксперимента**

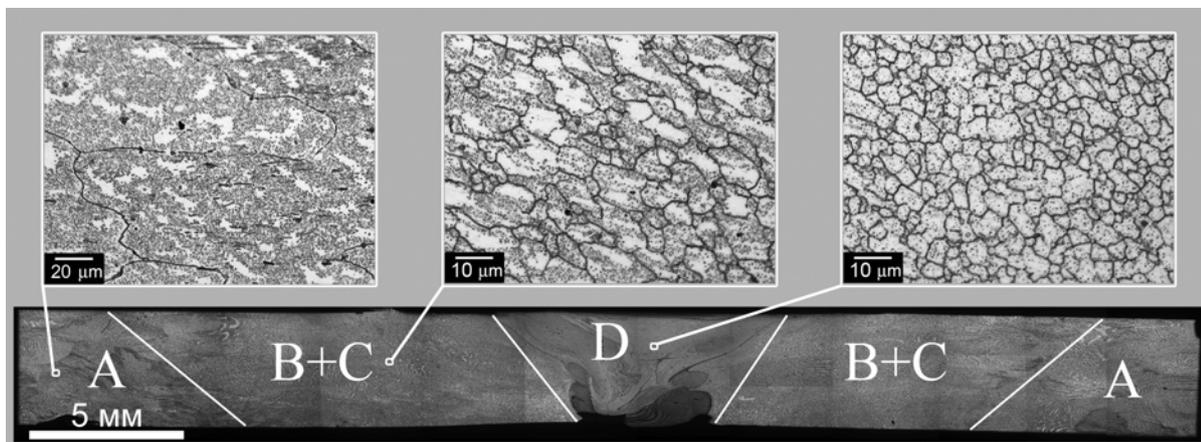
Сплав 1561 (Al–5,43%Mg–0,52%Mn–0,1%Zr–0,12%Si–0,014%Fe (по массе)) был гомогенизирован по следующей схеме: выдержка в течение 4 часов при 440 °С, затем нагрев до 500 °С и выдержка в течение 8 часов с последующим охлаждением на воздухе. Заготовки нагревали до 300 °С и прокатывали на холодных валках с промежуточными прогревами. Суммарная степень обжата составила 0,66. Часть листов была отожжена при 400 °С в течение одного часа для снятия субструктурного упрочнения.

Прокатанные листы соединяли сваркой трением с перемешиванием, так чтобы направление сварки совпадало с направлением прокатки. Скорость вращения инструмента равнялась 1100 об/мин, скорость подачи инструмента вдоль шва – 75 мм/мин. Характеристики статической прочности и пластичности измеряли при растяжении плоских образцов, вырезанных из прокатанных, отожженных и сваренных листов. Направление растяжения было перпендикулярно направлению прокатки и сварки. Микротвердость и микроструктуру изучали на поперечном сечении прокатанных и сваренных листов.

## **Результаты эксперимента и обсуждение**

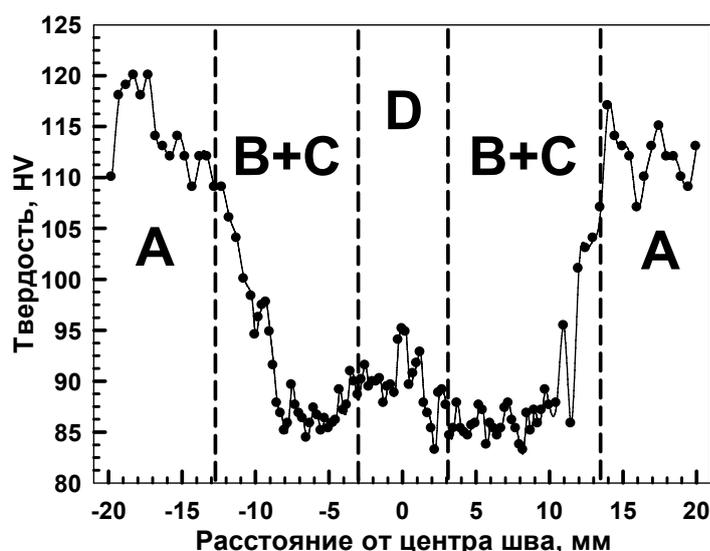
В результате прокатки в сплаве сохранялась крупнозернистая микроструктура со средним размером зерен около 100 мкм. Микротвердость прокатанных листов равная 134 HV и отожженных листов равная 88 HV свидетельствует о наклепанности микроструктуры после прокатки.

Сварка трением с перемешиванием приводит к свариванию сплава 1561 без образования в зоне сварного шва и прилегающей зоне пористости и горячих трещин (рис. 1). В зависимости от воздействия, оказываемого на материал, размер зерен сплава изменяется. В зоне перемешивания формировались равноосные зерна размером 6 мкм. В зоне термомеханического и теплового воздействия формируются зерна размером 10 мкм. Их размер примерно равен размеру зерен формирующихся в отожженных листах, который составлял 13 мкм.



**Рис. 1.** Поперечное сечение сварного шва. А – зона основного материала, не подвергнувшаяся воздействию процесса сварки; В+С – зона термомеханического и теплового воздействия; D – зона перемешивания.[2]

Сварка трением с перемешиванием оказывает значительное влияние на микротвердость сваренного материала. Зависимость микротвердости от расстояния до центра сварного шва показана на рисунке 2. Микротвердость основного материала составила около 112 HV. Микротвердость в зоне В+С при удалении от зоны основного материала постепенно уменьшалась и составила около 86 HV. Микротвердость материала в зоне D по сечению неодинакова и колеблется от 85 до 95 HV. Снижение микротвердости в зоне основного материала по сравнению с прокатанными листами связано с уменьшением эффекта субструктурного упрочнения из-за разогрева в процессе сварки.



**Рис. 2.** Микротвердость сварного шва.

Результаты испытаний на растяжение сварного шва, а также прокатанных и отожженных листов, которые включают в себя условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), предел прочности ( $\sigma_b$ ) и удлинение до разрыва ( $\delta$ ) представлены в табл. 1. Наибольшей прочностью и наименьшей пластичностью обладает сплав в прокатанном состоянии, что было связано с сильной наклепанностью микроструктуры. Отжиг прокатанного сплава приводит к снятию наклепа и формированию рекристаллизованной микроструктуры со средними размером зерен 13 мкм. Как результат происходит снижение условного предела текучести более чем в 2 раза, в то время как предел прочности снижается на 37 МПа. При этом пластичность сплава увеличивается. Результаты испытаний сварного соединения показывают, что сварка трением с перемешиванием повышает механические свойства сварного шва по сравнению с отожженным состоянием при сохранении пластичности. Условный предел текучести увеличивается примерно на 20%, а предел прочности на 10%. Формирование в зоне перемешивания микроструктуры с размером зерен равным 6 мкм, в соответствии с законом Холла–Петча, приводит к увеличению прочности сварного соединения по сравнению с отожженным материалом. Стоит отметить, что характеристики статической прочности коррелируют с микротвердостью измеренной на различных состояниях сплава.

**Таблица 1.** Механические характеристики прокатанных, отожженных листов и сварочного шва сплава 1561

	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
Прокатанное состояние	337	367	7
Отожженное состояние	155	330	30
Шов	180	350	30

### **Заключение**

Результаты работы показали, что листы сплава 1561 можно соединять сваркой трением с перемешиванием без образования дефектов свойственных традиционной сварке плавлением. При этом прочность сварного шва превосходит прочность отожженных листов при сохранении высокой пластичности. Результаты микроструктурных исследований показали, что повышенная прочность сварного шва обеспечена более мелкозернистой структурой формирующейся при сварке трением с перемешиванием.

*Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием Белгородского государственного университета в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы (государственного контракта № П977).*

### **Список литературы**

1. Tomotake Hirata, Taizo Oguri, Hideki Hagino. Influence of stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy: Materials Science and Engineering A, 2007, v.456, 344-349.
2. P. L. Threadgill, A. J. Leonard, H. R. Shercliff and P. J. Withers. Friction stir welding of aluminum alloys: International Materials Reviews, 2009, v.54, №2, 49-93.