



ПРОЧНОСТЬ И СТРУКТУРА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ И СВАРКОЙ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук, А. А. ЧАЙКА, И. Н. КЛОЧКОВ, М. Р. ЯВОРСКАЯ, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Проведен сравнительный анализ степени разупрочнения и уровня прочности сварных соединений пластичных низколегированных алюминиевых сплавов и высокопрочных сложнолегированных алюминиевых сплавов, полученных трением с перемешиванием и неплавящимся электродом. Показано, что прочность сварных соединений пластичных низколегированных сплавов одинакова при обоих способах сварки. Деформационное упрочнение швов высокопрочных сложнолегированных алюминиевых сплавов, полученное при сварке трением, обеспечивает более высокий уровень их прочности, чем при сварке плавлением.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, аргонодуговая сварка, плавящийся электрод, алюминиевые сплавы, степень разупрочнения, предел прочности, структура

Алюминиевые сплавы широко используются при изготовлении сварных конструкций в различных областях машиностроения. В зависимости от назначения и условий эксплуатации изменяются предъявляемые к ним требования, а следовательно, и применяемые при их изготовлении марки сплавов. Так, для слабонагруженных узлов или отдельных элементов сложной формы могут быть использованы пластичные низколегированные алюминиевые сплавы, легко поддающиеся объемному деформированию даже в холодном состоянии. В конструкциях ответственного назначения, подвергающихся значительному силовому воздействию, применяются высокопрочные сложнолегированные алюминиевые сплавы. Для получения неразъемных соединений в большинстве случаев используется аргонодуговая сварка неплавящимся электродом (АДСНЭ), обеспечивающая требуемое качество швов и высокий уровень их прочности [1–5].

В настоящее время для изготовления различных сварных конструкций из алюминиевых сплавов все больше применяется сварка трением с перемешиванием (СТП). При этом принцип образования шва основан на нагреве металла до пластического состояния в результате трения, перемешивании его по всей толщине свариваемых кромок и деформировании в замкнутом объеме [6, 7]. Такой способ получения неразъемных соединений наиболее приемлем для пластичных материалов, имеющих низкую температуру плавления. Он может быть реализован для различных марок

алюминиевых сплавов и имеет ряд преимуществ по сравнению с другими способами получения неразъемного соединения [8, 9]:

образование шва в твердой фазе позволяет избежать возникновения горячих трещин, макровключений оксидной пленки, пор и других дефектов, обусловленных расплавлением и кристаллизацией металла при сварке плавлением;

нагрев металла в зоне сварки в результате трения исключает ультрафиолетовое излучение дуги, выделение дыма и паров металла и снижает уровень шума;

формирование соединения без расплавления металла можно осуществлять без применения защитного газа и в любом пространственном положении;

отсутствие дугового разряда и расплавленного металла исключает потерю легирующих элементов в шве на угар и необходимость повышения их содержания за счет применения присадочных материалов;

получение шва без дугового разряда позволяет беспрепятственно использовать этот процесс при наличии сильных электромагнитных полей;

перемешивание пластифицированного металла под избыточным давлением в ограниченном объеме приводит к дроблению макрочастиц оксидных включений, снижая требования к предварительной подготовке поверхностей свариваемых кромок;

проникновение наконечника инструмента на всю глубину стыка позволяет сваривать металл различной толщины без специальной разделки кромок;

протекание процесса сварки при более низкой температуре приводит к уменьшению степени ра-



Таблица 1. Механические свойства листов из алюминиевых сплавов толщиной 1,8 мм

Марка сплава	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	α , град
АМцН	218	178	6	180
АМг2М	176	88	23	180
АМг5М	332	160	22	142
АМг6М	359	210	22	96
1420	459	322	11	50
1201	423	303	12	60
1460	565	523	9	36

зупрочнения материала и уровня остаточных деформаций в конструкциях;

повышение эффективности использования энергии при СТП и уменьшение температуры нагрева металла в зоне сварки снижают энергоёмкость процесса по сравнению со сваркой плавлением;

процесс сварки можно легко автоматизировать и обеспечить стабильное качество швов без высокой квалификации оператора.

Благодаря таким преимуществам процесс СТП открывает более широкие технологические возможности для изготовления сварных конструкций из таких сплавов, соединить которые сваркой плавлением невозможно из-за образования горячих трещин в швах; обеспечения более высокого уровня прочности швов термически упрочняемых и нагартованных алюминиевых сплавов; соединения метастабильных сплавов, полученных быстрой кристаллизацией металла из расплава, композитов и наноматериалов; получения сварных узлов, которые нецелесообразно экономически или невозможно практически прессовать или отливать целиком из серийно изготавливаемых отдельных профилей.

Цель данной работы — сравнение прочности, степени разупрочнения и структуры сварных соединений пластичных низколегированных и вы-

сокопрочных сложнoleгированных алюминиевых сплавов, полученных способами СТП и АДСНЭ.

Для проведения экспериментальных исследований использовали пластичные низколегированные алюминиевые сплавы АМцН, АМг2М и АМг5М, а также высокопрочные сложнoleгированные алюминиевые сплавы АМг6М, 1420, 1201 и 1460. Механические свойства свариваемых листов толщиной 1,8 мм приведены в табл. 1. АДСНЭ выполняли со скоростью 20 м/ч на установке MW-450 («Фрониус», Австрия) с использованием соответствующих присадочных материалов (табл. 2), СТП — на сконструированной в ИЭС им. Е. О. Патона лабораторной установке. Из полученных сварных соединений изготавливали стандартные образцы для определения предела прочности при одноосном растяжении. Испытания проводили с помощью универсальной многоцелевой сервогидравлической системы MTS 810. Образцы, полученные АДСНЭ, испытывали после снятия проплавов швов заподлицо с основным металлом, а также с дополнительно зачищенными их усилениями, поскольку в сварных конструкциях применяются те и другие виды соединений. В образцах, полученных СТП, усиления и проплавы отсутствуют, поэтому дополнительная механическая зачистка швов не требовалась. Степень разупрочнения металла в зоне сварки оценивали по результатам измерения его твердости на приборе ROSKWELL при нагрузке 600 Н и диаметре шарика 1/16". Для сварных соединений пластичных сплавов АМцН и АМг2М микротвердость металла измеряли с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 0,1 Н. Исследования микроструктуры полученных сварных соединений проводили с использованием оптического микроскопа МИМ-8М. Поперечные шлифы соединений, полученных АДСНЭ и СТП, предварительно подготавливали с помощью электролитического полирования и дополнительного травления их в растворе хлорной, азотной и плавиковой кислот.

Таблица 2. Режимы сварки алюминиевых сплавов различными способами

Марка сплава	АДСНЭ				СТП	
	Присадочный материал (размер, мм)	$v_{пр}$, м/ч	$I_{св}$, А	Q_{Ar} , л/мин	N , об/мин	$v_{св}$, м/ч
АМцН	АМцН (4,5×2,0)	—	140	15	2880	38
АМг2М	АМг2М (4,5×2,0)	—	135	15	2880	38
АМг5М	СвАМг5 (Ø 1,6)	82	140	15	1420	14
АМг6М	СвАМг6 (Ø 1,6)	82	130	15	1420	8
1420	СвАМг63 (Ø 1,6)	82	130	20	1420	14
1201	Св1201 (Ø 1,6)	82	145	15	1420	14
1460	Св1201 (Ø 1,6)	82	140	20	1420	8



Таблица 3. Предел прочности сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных различными способами сварки

Марка сплава	АДСНЭ				СТП	
	Образец с усилением		Образец без усиления		Образец без усиления	
	σ_B , МПа	Место разрушения	σ_B , МПа	Место разрушения	σ_B , МПа	Место разрушения
АМцН	113	ЗТВ	113	ЗТВ	113	ЗТМВ
АМг2М	170	»	170	»	170	ЗТВ
АМг5М	320	»	300	Шов	320	»
АМг6М	345	ЗС	324	»	336	ЗТМВ
1420	373	»	320	»	342	ЗС
1201	296	»	239	»	310	»
1460	311	»	257	»	309	ЗТМВ

Примечание. Приведены средние значения показателей по результатам испытания трех-пяти образцов.

Проведенные экспериментальные исследования позволили оценить степень разупрочнения, уровень прочности и структурные особенности соединений, полученных сваркой плавлением и в твердой фазе. Установлено, что при АДСНЭ пластичных низколегированных алюминиевых сплавов АМцН и АМг2М минимальная твердость имеет место в металле ЗТВ, где и происходит разрушение образцов при растяжении, а в сварных соединениях сплава АМг5М минимальная твердость металла — в центральной части шва. Поэтому образцы без усиления разрушаются по шву, а с усилением — по ЗТВ.

При СТП сплава АМцН минимальная твердость металла отмечается в зоне термомеханического влияния (ЗТМВ) со стороны отхода инструмента, где и происходит разрушение образцов. Сварные соединения сплавов АМг2М и АМг5М, полученные СТП, разрушаются в ЗТВ,

где твердость металла минимальная. Следует отметить, что минимальные значения твердости металла в зоне разрушения образцов сварных соединений сплавов АМцН и АМг2М, полученных обоими способами сварки, примерно одинаковы, их предел прочности находится на уровне соответственно 113 и 170 МПа (табл. 3). Только образцы без усиления из сплава АМг5М, полученные АДСНЭ, имеют меньшую (300 МПа) прочность и разрушаются в центральной части шва, где металл характеризуется минимальной твердостью. Поэтому структурные изменения в металле шва и зонах сплавления (ЗС) его с основным металлом, происходящие при сварке этих сплавов плавлением или в твердой фазе (рис. 1), практически не влияют на прочность сварных соединений.

Характер разупрочнения металла в ЗС при СТП различный для высокопрочных сложнеле-

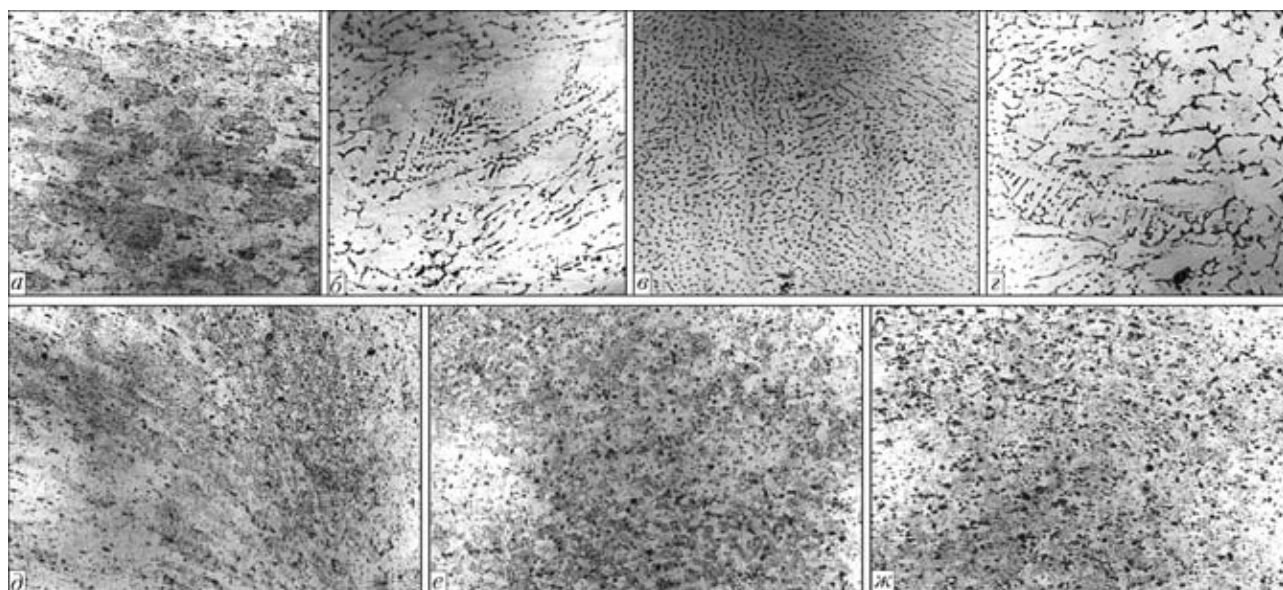


Рис. 1. Микроструктура (X400) основного металла (а) и сварных соединений сплава АМг2М, полученных АДСНЭ (б, з — ЗС шва с основным металлом; в — шов) и СТП (д, ж — соответственно ЗТМВ со стороны набегающего и отхода инструмента; е — ядро шва)

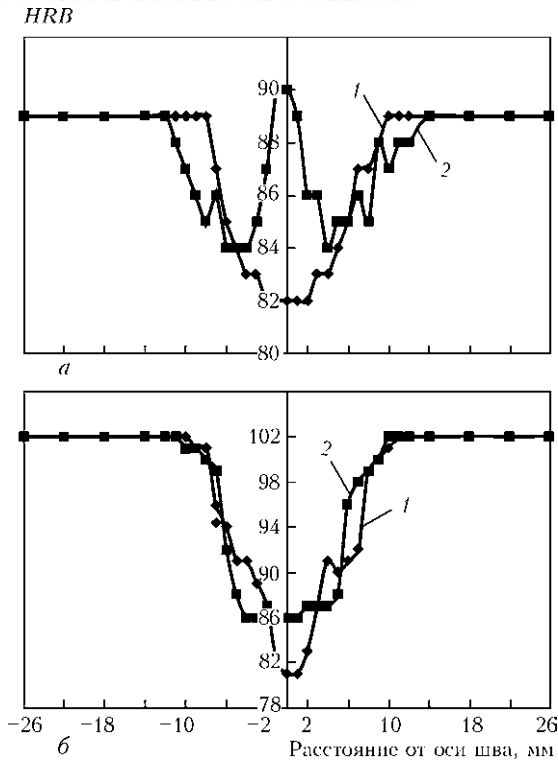


Рис. 2. Распределение твердости металла сварных соединений сплава АМг6М (а) и 1420 (б), полученных АДСНЭ (1) и СТП (2)

гированных деформируемых и термически упрочняемых сплавов.

Так, при сварке в твердой фазе сплава АМг6М образование мелкодисперсных зерен в шве приводит к его деформационному упрочнению (рис. 2, а). Поэтому разрушение таких образцов происходит по ЗТВ, где твердость металла минимальная, а прочность находится на уровне 336 МПа. Образцы без усиления, полученные способом АДСНЭ, разрушаются по шву и имеют предел прочности 324 МПа. Максимальной прочностью (345 МПа) характеризуются образцы с

усилением, разрушающиеся при растяжении по ЗС шва с основным металлом.

В термически упрочняемых сплавах (1420, 1201 и 1460) твердый раствор находится в пере-сыщенном состоянии. Поэтому в результате термомеханического воздействия в швах, кроме измельчения зерен, происходит разупрочнение металла, обусловленное выделением избыточных интерметаллидных фаз из твердого раствора и их коагуляцией. Мелкие упрочняющие фазы в ядре шва частично растворяются, а крупные легкоплавкие интерметаллидные включения частично расплавляются, образуя новый твердый раствор. В результате разупрочнение, обусловленное выделением избыточных фаз, преобладает над упрочнением, достигнутым в результате уменьшения размера зерен в швах, полученных СТП (рис. 2, б). При этом твердость металла шва, ЗС его с основным металлом и ЗТМВ практически одинакова, разрушение образцов термически упрочняемых сплавов происходит на этих участках.

В сварных соединениях таких сплавов, полученных АДСНЭ, минимальная твердость металла наблюдается в центральной части швов, где и происходит разрушение образцов без усиления. Однако предел прочности сварных соединений, полученных СТП, всегда выше, чем образцов без усиления, выполненных АДСНЭ. При этом разница в прочности существенно зависит от химического состава свариваемого сплава. Так, если для сплава 1420 она составляет всего 22 МПа, то для сплавов 1460 и 1201 — соответственно 52 и 71 МПа. Это обусловлено особенностями формирования швов при АДСНЭ и СТП. Образование соединений в твердой фазе в результате перемещения пластифицированного металла в ограниченном объеме при избыточном давлении способствует измельчению зерен, увеличению объемной доли границ и дроблению интерметаллидных фаз. При сварке плавлением из расплава

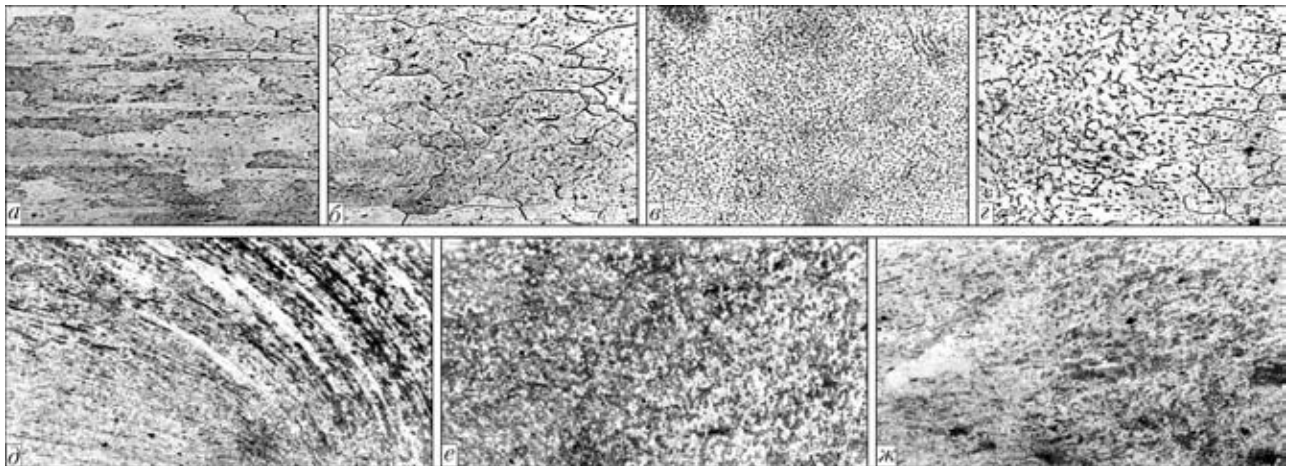


Рис. 3. Микроструктура (×400) основного металла (а) и сварных соединений сплава 1460, полученных АДСНЭ (б, в — ЗС шва с основным металлом; д, е — шов) и СТП (д, ж — соответственно ЗТМВ со стороны набегания и отхода инструмента; е — ядро шва)



сварочной ванны при небольшой скорости его охлаждения кристаллизуются крупные зерна литого металла шва (рис. 3).

Образцы с усилением, полученные АДСНЭ, всегда разрушаются по ЗС шва с основным металлом и имеют более высокую прочность, чем образцы без усиления, разрушающиеся по металлу шва. Однако по сравнению с образцами, полученными СТП, их предел прочности может быть выше (1420), ниже (1201) или находиться на одном уровне (1460) в зависимости от свойств свариваемого алюминиевого сплава.

В заключение следует отметить, что прочность сварных соединений пластичных низколегированных алюминиевых сплавов, полученных СТП и АДСНЭ, находится практически на одном уровне, поскольку разрушение образцов происходит в ЗТВ, где степень разупрочнения металла одинакова.

Деформационное упрочнение швов, происходящее при СТП высокопрочных сложнoleгированных алюминиевых сплавов АМг6М, 1420, 1201 и 1460, обеспечивает более высокий уровень их прочности, чем у образцов без усиления, полученных АДСНЭ.

Перемещение пластифицированного металла при избыточном давлении в ограниченном пространстве при СТП способствует формированию в центральной части шва ядра с ультрадисперсной структурой, а в ЗТМВ — изогнутых вытянутых и равноосных зерен, ориентированных в направлении перемещения инструмента. Измельчение зерен, увеличение объемной доли их границ и

дробление интерметаллидных фаз в швах при СТП алюминиевых сплавов способствует снижению уровня их разупрочнения по сравнению с АДСНЭ.

1. *Промышленные* алюминиевые сплавы: Справ. / С. Г. Алиева, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян и др. — М.: Металлургия, 1984. — 528 с.
2. *Рабкин Д. М., Игнатъев В. Г., Довбищенко И. В.* Состояние и перспективы применения алюминиевых сплавов в сварных конструкциях. — Киев: Наук. думка, 1975. — 48 с.
3. *Колобнев Н. И., Фридляндер И. Н.* Алюминий-литиевые сплавы — новый этап снижения массы летательных аппаратов // *Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков: Сб. науч. тр.* — М.: ГИ ВИАМ, 1994. — С. 89–92.
4. *Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях / А. Я. Ищенко, Т. М. Лабур, В. Н. Бернадский, О. К. Маковецкая.* — Киев: Екотехнологія, 2006. — 112 с.
5. *Овчинников В. В., Дриц А. М., Крымова Т. В.* Технологические особенности производства сварных конструкций летательных аппаратов из алюминий-литиевого сплава 1460 // *Свароч. пр-во.* — 1997. — № 12. — С. 26–29.
6. *Dawes C. J.* An introduction to friction stir welding and its development // *Weld. and Metal Fabr.* — 1995. — № 1. — P. 13–16.
7. *Покляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Яворская М. Р.* Прочность сварных соединений алюминиевых сплавов при сварке трением с перемешиванием // *Проблемы ресурса і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / За ред. Б. Є. Патона.* — К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2006. — С. 365–367.
8. *Kallee S., Nicholas D.* Causing a stir in the future // *Welding and Joining.* — 1998. — № 2. — P. 18–21.
9. *Ищенко А. Я., Подъяельников С. В., Покляцкий А. Г.* Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) // *Автомат. сварка.* — 2007. — № 11. — С. 32–38.

Comparative analysis of the degree of softening and level of strength of welded joints of ductile low-alloyed aluminium alloys and high-strength complex-alloyed aluminium alloys produced by friction stir and non-consumable electrode welding has been performed. It is shown that the strength of welded joints of ductile low alloys is the same with both welding processes. Deformation strengthening of welds of high-strength complex aluminium alloys achieved in friction welding, provides a higher level of their strength than in fusion welding.

Поступила в редакцию 30.01.2009

24–27 ноября 2009 г.

VIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2009

УКРАИНА, КИЕВ, МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР

В рамках форума состоится научно-практическая конференция
«Технические решения для систем автоматизации производства»

Украина, 02660, Киев, Броварской проспект, 15

тел.: +380 44 201-11-78, 206-87-96

www.tech-expo.com.ua; www.iec-expo.com.ua