



ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ТОНКОЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук, чл.-кор. НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО, М. Р. ЯВОРСКАЯ, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности формирования швов при сварке алюминиевых сплавов плавлением под воздействием высокотемпературного нагрева и трением с перемешиванием, обеспечивающего формирование шва за счет пластической деформации металла в зоне сварки. Приведена технологическая схема процесса сварки трением с перемешиванием и описаны основные принципы его реализации с помощью сконструированной лабораторной установки. Проанализированы показатели прочности и пластичности сварных соединений тонколистовых (1,8...2,4 мм) высокопрочных алюминиевых сплавов, полученных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом и трением с перемешиванием.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы, аргонодуговая сварка неплавящимся электродом, прочность, твердость, угол загиба

С развитием современных отраслей машиностроения все более возрастают требования к надежности сварных соединений. В Украине в большинстве случаев для изготовления сварных конструкций из алюминиевых сплавов применяют дуговые и лучевые способы сварки. Они обеспечивают получение неразъемных соединений за счет формирования швов, образующихся в результате расплавления свариваемых кромок под воздействием высокотемпературного источника нагрева. Вследствие необратимости физико-химических процессов, имеющих место в алюминиевых сплавах при сварке плавлением, в зоне сварки происходят фазовые превращения и образуются зоны с различными структурами. Отличия в структуре металла шва и зоны термического влияния приводят к неравномерному распределению остаточных деформаций и напряжений и снижают эксплуатационные характеристики соединений. Наличие в структуре металла оплавленных границ зерен и грубых фазовых включений ограничивает пластическую деформацию и вызывает увеличение локальных напряжений на участках, расположенных между границами зерен. Общее напряженное состояние сварных соединений может превысить предел текучести и привести к зарождению микротрещин, которые уменьшают прочность конструкций и инициируют появление усталостных трещин, что снижает ресурсные и эксплуатационные характеристики сварных изделий.

Характерно также, что современный уровень развития техники требует применения в сварных конструкциях различных сплавов, разработанных

на основе более сложных систем легирования и полученных с использованием новых технологий. Такие материалы характеризуются необходимым комплексом физико-механических характеристик и часто плохо соединяются сваркой плавлением. Поэтому для получения неразъемных соединений из алюминиевых сплавов весьма перспективным является сварка трением с перемешиванием (СТП), при которой формирование шва обеспечивается за счет локализации выделения теплоты и пластической деформации металла в зоне сварки [1, 2].

Макроскопического расплавления металла при указанном способе сварки не происходит, поэтому степень структурно-фазовых превращений в металле шва и зоне термического влияния намного ниже, чем при сварке плавлением. Это обеспечивает получение более высоких физико-механических свойств сварных соединений и наличие меньшего уровня остаточных напряжений. При этом вероятность зарождения микротрещин снижается, что способствует повышению ресурсных и эксплуатационных характеристик сварных соединений [3, 4].

Технологический процесс СТП (рис. 1), разработанный в 1991 г. Вэйном Томасом из Британского института сварки, включает три основных этапа [5, 6]. На первом вращающийся инструмент 1 погружают в стык соединяемых деталей 4 и 5 таким образом, чтобы рабочая поверхность бурта 2 инструмента вошла в контакт с их поверхностью. В месте контакта нижней поверхности вращающегося рабочего наконечника инструмента с деталями выделяется тепло. Это приводит к пластическому течению металла из-под рабочего наконечника, в результате чего он постепенно погружается, увеличивая тем самым площадь соприкасающихся поверхностей и количество тепло-

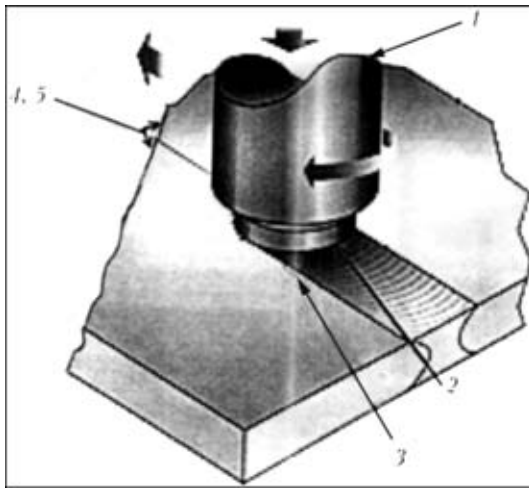


Рис. 1. Схема процесса СТП алюминиевых сплавов: 1 — вращающийся инструмент; 2 — рабочая поверхность бурта инструмента; 3 — сварной шов; 4, 5 — свариваемые детали

ты, выделяемой за счет трения. После полного погружения рабочего наконечника на всю толщину свариваемого металла возникает трение между поверхностями бурта и деталей. В результате нагрева металл переходит в пластическое состояние, после чего приступают ко второму этапу сварки — перемещению вращающегося инструмента вдоль линии стыка. Линейное перемещение инструмента приводит к пластическому течению металла от фронта бурта инструмента к его противоположной стороне, где металл охлаждается и образует сварной шов 3. Такой шов несимметричен относительно своей продольной оси, поскольку материал с одной (фронтальной) стороны вытесняется рабочим наконечником на другую (тыльную) сторону. На последнем этапе процесса сварки (в конце шва) инструмент поднимают до полного выхода его рабочего наконечника из стыка и прекращают его вращение. При этом свариваемые детали жестко закрепляются и прижимаются к подкладке во избежание перемещения или выгиба их в процессе сварки [5, 7].

Для реализации процесса СТП тонколистовых (1,8...2,5 мм) алюминиевых сплавов создана лабораторная установка (рис. 2), которая позволяет получать стыковые и нахлесточные соединения со швом длиной до 400 мм. Установка состоит из подвижного стола, перемещающегося со скоростью до 40 м/ч, на котором фиксируются свариваемые детали, и жесткого каркаса, на котором закреплен асинхронный двигатель. С помощью суппорта осуществляется вертикальное перемещение двигателя, при этом происходит погружение рабочего наконечника инструмента в свариваемый металл в начале шва



Рис. 2. Внешний вид лабораторной установки для СТП тонколистовых (1,8...2,5 мм) алюминиевых сплавов

и выведение его из металла при завершении процесса сварки. Непосредственно на валу электродвигателя закреплен инструмент, вращающийся с частотой, обеспечиваемой электродвигателем.

На сконструированной установке получали стыковые соединения из алюминиевых сплавов основных систем легирования толщиной 1,8...2,4 мм. Механические свойства исследуемых сплавов приведены в табл. 1.

Сварку трением с перемешиванием осуществляли специальным инструментом с диаметром бурта 12 мм и коническим рабочим наконечником, имеющим диаметр у основания 3,5 мм. Корень шва формировался на плоской подкладке из нержавеющей стали без канавки. При частоте вращения инструмента 2880 об/мин получение качественных сварных соединений исследуемых

Таблица 1. Механические свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	Временное сопротивление $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Угол загиба α , град
АМг6	370	228	21,2	180
	359	220	22,3	96
1420	459	322	11,4	50
	486	311	15,4	52
1201	427	303	11,9	60
	423	308	11,9	73
1460	504	460	8,90	36
	486	445	17,7	37

Примечания. 1. Здесь и в табл. 2 приведены средние значения показателей по результатам испытаний трех образцов. 2. В числителе приведены значения образцов, вырезанных вдоль проката, в знаменателе — поперек проката.

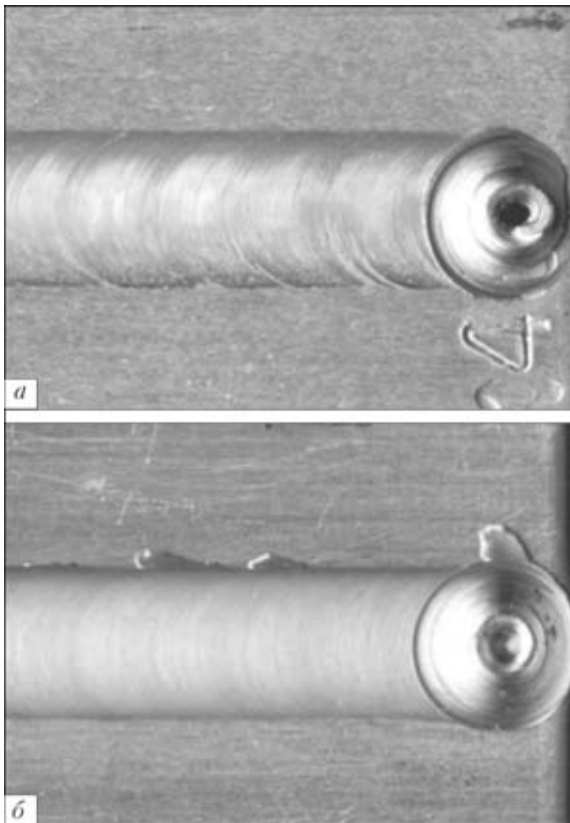


Рис. 3. Внешний вид швов, выполненных СТП на алюминиевых сплавах 1460 толщиной 2,2 мм (а) и АМг6 толщиной 1,8 мм (б)

алюминиевых сплавов обеспечивалось при скорости сварки 233 мм/мин (рис. 3). Сварные швы располагались параллельно направлению проката листов.

Из полученных сварных соединений изготавливали стандартные образцы для механических испытаний, которые шлифовали с лицевой стороны шва, чтобы сделать основной металл равнотолщинным со швом, и с корневой — чтобы избежать возможных дефектов в виде несплавлений. Кроме того, на отдельных образцах исследовали распределение твердости в металле швов и зонах термического влияния, а также оценивали их структурные особенности. Результаты механических испытаний образцов приведены в табл. 2.

Анализ результатов показал, что прочность сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных СТП, находится на достаточно высоком уровне и превышает показатели, достигнутые при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом (АДСНЭ). Так, например, у сварных соединений сплавов АМг6 и 1420 временное сопротивление выше на

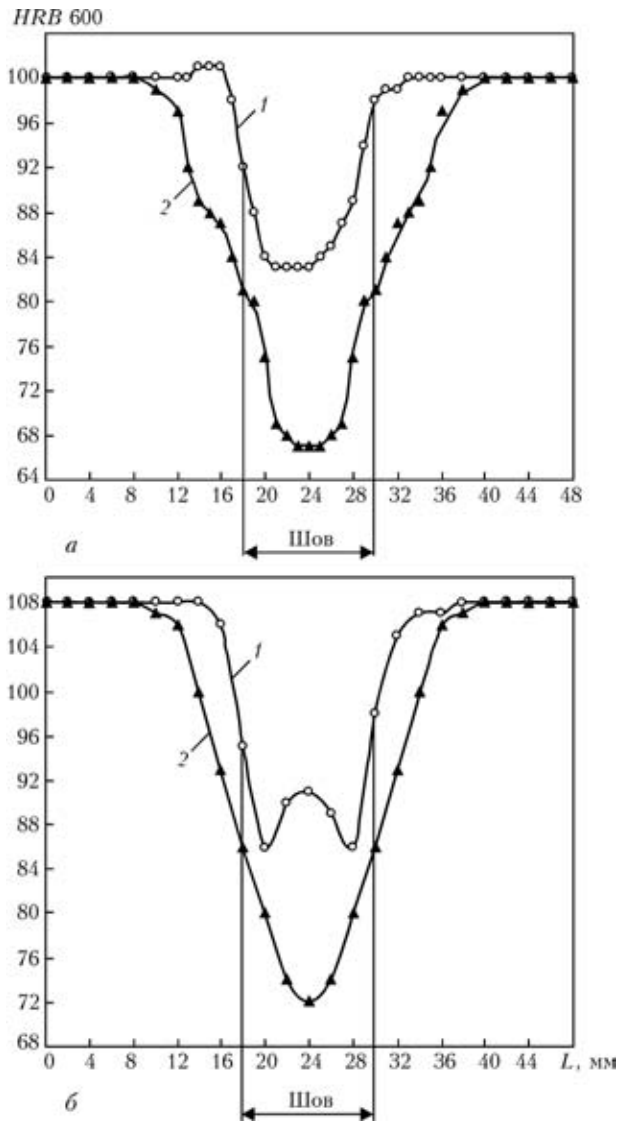


Рис. 4. Распределение твердости в стыковых соединениях сплавов 1201 толщиной 2,0 мм (а) и 1460 толщиной 2,2 мм (б), полученных СТП (1) и АДСНЭ (2)

Таблица 2. Прочностные и пластические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных способами СТП и АДСНЭ

Марки свариваемых сплавов	σ_v , МПа		α , град	
	СТП	АДСНЭ	СТП	АДСНЭ
АМг6 + АМг6	343(с)	313(в)	180	180
1420+1420	362(в)	320(в)	96	82
1201+1201	294(в)	280(в)	180	180
1460+1460	325(в)	305(в)	180	174
1460+1201	310(в)	285(в)	180	176
АМг6+1201	229(а)	—	180	—
АМг6+1460	323(в)	—	180	—

Примечание. При указании места разрушения образцов приняты следующие обозначения: а — по металлу шва; в — в зоне сплавления шва с основным металлом; с — по основному металлу в зоне термического влияния.

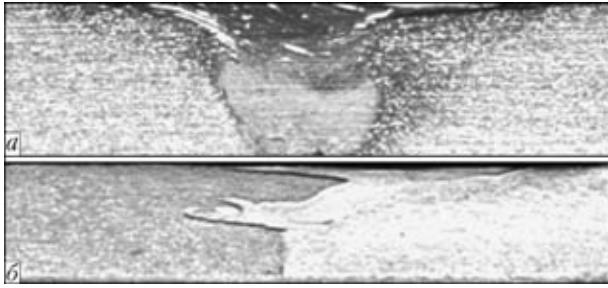


Рис. 5. Поперечные макрошлифы швов, выполненных СТП на алюминиевых сплавах 1420 + 1420 толщиной 2,4 мм (а) и АМг6 + 1420 толщиной 2,0 мм (б)

30...40 МПа, а у сплавов 1201 и 1460 — на 15...20 МПа. При этом угол загиба сварных соединений также не ниже, чем у полученных плавлением. Кроме того, способом СТП успешно сварены между собой сплавы АМг6 + 1201 и АМг6 + 1460. В случае их сварки плавлением очень часто при кристаллизации расплавленного металла образуются горячие трещины, обусловленные критическим содержанием магния и меди в свариваемых сплавах.

Кривые распределения твердости в сварных соединениях, представленные на рис. 4, показали, что при использовании высокотемпературного источника нагрева, применяемого при сварке плавлением, происходит значительный нагрев металла и существенное его разупрочнение в зоне сварки. При этом литой металл шва имеет минимальную твердость. Однако поскольку сечение шва увеличено за счет усиления, то разрушение всех исследуемых образцов должно происходить по зоне сплавления шва с основным металлом, что и подтвердили результаты механических испытаний. При СТП макроскопического расплавления металла не происходит — он нагревается только до пластического состояния. Поэтому распределение твердости в металле сварного соединения, полученного СТП, свидетельствует о меньшем тепловом воздействии на все его участки. Кроме того, металл шва подвергается пластическому деформированию за счет прижатия рабочей поверхности инструмента к поверхностям свариваемых листов,

что обеспечивает его более высокую твердость, чем при сварке плавлением.

Характерной особенностью швов, выполненных СТП, является их несимметричное расположение относительно продольной оси, о чем свидетельствуют кривые распределения твердости (рис. 4), а также поперечные макрошлифы. Это особенно четко просматривается на макрошлифах швов, выполненных СТП на разноименных алюминиевых сплавах (рис. 5). Такая форма шва получается вследствие того, что металл с одной стороны (фронтальной) вытесняется рабочим наконечником инструмента и переносится на другую (тыльную).

Таким образом, созданная лабораторная установка для СТП позволяет получать качественные сварные соединения тонколистовых алюминиевых сплавов. Применение этого способа сварки обеспечивает соединениям более высокий, чем при АДСНЭ, уровень механических свойств. Процесс формирования швов без макроскопического расплавления металла, характерного для дуговых процессов сварки, позволяет соединять способом плавления трудносвариваемые алюминиевые сплавы и расширяет возможности применения разноименных сплавов при изготовлении сварных конструкций для различных отраслей машиностроения.

1. *Pat. 5460317 US. Friction stir butt welding / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham et al. — Publ. Oct. 1995.*
2. *Kninstrom K.-E., Pekkari B. A novel joining process — friction stir welding // Svetsaren. — 1997. — № 1/2. — P. 49–52.*
3. *Larsson H., Karlsson L. Friction stir welding of AA5083 and AA6082 aluminium // Ibid. — 2000. — № 2. — P. 6–10.*
4. *Lanciotti A., Vitali F. Characterisation of friction stir welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates // Welding Intern. — 2003. — № 8. — P. 624–630.*
5. *Третьяк Н. Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка. — 2002. — № 7. — С. 12–21.*
6. *Dawes C. J., Thomas W. M. Friction stir process welds of aluminum alloys // Welding J. — 1996. — № 3. — P. 41–45.*
7. *Степанов В. В., Конкевич В. Ю., Фролов В. А. Формирование соединений при сварке трением по способу Friction Stir Welding // Технология легких сплавов. — 2003. — № 1. — С. 58–67.*

The paper deals with the features of weld formation in fusion welding of aluminium alloys under the impact of high-temperature heating and friction stir welding, ensuring weld formation due to plastic deformation of the metal in the welding zone. Technological sequence of friction stir welding process is given and the main principles of its implementation using the designed laboratory unit are described. Strength and ductility indices of welded joints on sheet (1,8...2,4 mm) high-strength aluminium alloys produced by nonconsumable-electrode argon-arc and friction stir welding have been analyzed.

Поступила в редакцию 15.02.2007