

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ТОНКОЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

А.Г. Покляцкий

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Определены оптимальные параметры режимов сварки трением с перемешиванием широко используемых при изготовлении сварных конструкций алюминиевых сплавов различных систем легирования толщиной 0,8...3,0 мм. Показано, что качественное формирование швов можно обеспечить при погружении инструмента в свариваемый металл на глубину 0,10...0,15 мм за счет правильного выбора частоты вращения инструмента и скорости сварки. Установлена взаимосвязь между суммарным содержанием легирующих и модифицирующих элементов в свариваемом алюминиевом сплаве, скоростью сварки и частотой вращения инструмента. Определен диапазон оптимальных соотношений, выражающих длину линейного перемещения инструмента вдоль стыка за один его оборот, в котором обеспечивается качественное формирование швов тонколистовых алюминиевых сплавов АМцН, АД33, АМг2М, 1460, АМг5М, 1201 и АМг6М. Получены формулы, отражающие зависимости в виде степенных функций, ограничивающие этот диапазон и позволяющие рассчитать необходимые скорости вращения и перемещения инструмента для любого алюминиевого сплава, содержащего 2,2...8,4 % легирующих и модифицирующих элементов. Показаны характерные дефекты, образующиеся в швах при отклонении указанных параметров от оптимального диапазона. Библиогр. 18, рис. 5.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сварка трением с перемешиванием, скорость вращения инструмента, скорость сварки, характерные дефекты

Сварка трением с перемешиванием (СТП), являющаяся одним из новейших способов получения неразъемных соединений в твердой фазе, находит все более широкое применение в судостроении, при изготовлении наземного и воздушного транспорта, космической техники и т. п. [1–4].

Образование шва в результате нагрева за счет трения до пластического состояния, перемешивания и пластического деформирования небольшого объема металла соединяемых деталей в замкнутом пространстве, обеспечивает некоторые преимущества этого процесса по сравнению со сваркой плавлением. В первую очередь это возможность избежать дефектов в виде горячих трещин, пор, макровключений оксидной пленки и т. п., обусловленных расплавлением и кристаллизацией металла. Кроме того, сварка алюминиевых сплавов осуществляется без применения защитного газа и присадочного материала и позволяет избежать ультрафиолетового излучения, выделений дыма и паров металла. При этом обеспечиваются высокие механические свойства соединений, а степень разупрочнения основного материала и деформирование сварных конструкций снижаются [3, 5–8].

Однако как и при любом способе сварки, получить бездефектные соединения при СТП удастся только при определенных параметрах процесса. Неправильный выбор или отклонение их от оптимального значения может приводить к образова-

нию характерных поверхностных или внутренних дефектов в виде грата, несплавлений и несплошностей [9–11].

Основными параметрами процесса СТП, кроме конструктивных особенностей рабочих поверхностей инструмента, принято считать угол наклона инструмента относительно вертикальной оси, усилие прижатия инструмента к поверхностям соединяемых деталей, величину погружения бурта инструмента и глубину проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл, а также скорости вращения и его линейного перемещения (скорости сварки) [5, 9].

Проведенные зарубежными специалистами исследования показали, что сварку необходимо выполнять «углом вперед», отклоняя инструмент под небольшим углом от вертикальной оси. При этом за счет прикладываемого к инструменту усилия в вертикальной плоскости его бурт незначительно погружается в свариваемый металл и удерживается в плотно прижатом к нему состоянии в процессе сварки. Наконечник инструмента должен обеспечивать перемешивание металла по всей толщине свариваемых кромок, чтобы избежать дефекта в виде несплавления в нижней части шва [12–15]. Скорости вращения и линейного перемещения инструмента в значительной степени определяют объем пластифицированного металла в зоне сварки и температуру его нагрева. Они могут изменяться в достаточно широком диапазоне в зависимости от толщины свариваемого

материала, его теплофизических и пластических характеристик, а также траектории перемещения пластифицированного металла, определяемой конструктивными особенностями рабочих поверхностей инструмента [9, 16]. Некоторые исследователи определили оптимальные соотношения между скоростями сварки и частотами вращения инструмента, выражающими длину линейного перемещения инструмента вдоль стыка за один его оборот, в зависимости от толщины свариваемого материала или температурного интервала кристаллизации алюминиевых сплавов [14, 17].

Цель данной работы — определить оптимальные параметры режимов сварки трением с перемешиванием широко используемых при изготовлении сварных конструкций алюминиевых сплавов различных систем легирования толщиной 0,8...3,0 мм.

Методика проведения исследований. Сварку трением с перемешиванием листов из алюминиевых сплавов АМцН, АД33, АМг2М, АМг5М, АМг6М, 1201 и 1460 толщиной от 0,8 до 3,0 мм выполняли на лабораторной установке, сконструированной в ИЭС им. Е.О. Патона. Для получения стыковых соединений использовали специальный инструмент с диаметром бурта 12 мм и наконечником конической формы [18]. Длину наконечника инструмента выбирали таким образом, чтобы она была на 0,15 мм меньше толщины свариваемого металла. Сварку выполняли углом вперед при наклоне инструмента относительно вертикальной оси на 2...3°. Вращение инструмента осуществлялось с помощью сменных серийных асинхронных электродвигателей переменного тока ($U = 380$ В) мощностью 4 кВт и частотой вращения вала $N = 1420$ и 2880 об/мин, устанавливаемых на суппорте. С помощью последнего закрепленный на валу электродвигателя инструмент перемещался в вертикальной плоскости, благодаря чему обеспечивалось необходимое заглубление его рабочих частей в свариваемый материал и поддерживалась постоянная величина осевого усилия его прижатия к соединяемым деталям в процессе сварки. Свариваемые листы надежно фиксировались на стальной подкладке подвижного стола. При этом скорость сварки можно было изменять в пределах $v_{св} = 2...42$ м/ч. Специально установленный впереди инструмента прижимной ролик препятствовал изменению в процессе сварки пространственного положения кромок слишком чувствительного к тепловому воздействию тонколистового материала.

Наличие макродефектов в виде грата и несплавления на поверхностях сварных соединений определяли с помощью визуального контро-

ля. Внутренние дефекты выявляли на поперечных шлифах, предварительно подготовленных с помощью электролитического полирования и дополнительного травления их в растворе хлорной, азотной и плавиковой кислот, используя оптический микроскоп МИМ-8М.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате проведенных исследований установлено, что при сварке трением с перемешиванием тонколистовых алюминиевых сплавов качественное формирование швов можно обеспечить за счет правильного выбора глубины погружения инструмента в свариваемый металл, частоты вращения инструмента и скорости его линейного перемещения вдоль стыка или скорости сварки ($v_{св}$).

Глубина погружения инструмента обуславливает термомодеформационные условия во всех зонах сварного соединения, поскольку одновременно предопределяет величину погружения бурта инструмента и глубину проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл. Снижение ее ($<0,10$ мм) приводит к уменьшению величины заглубления бурта и глубины проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл. Как результат, давление под рабочей поверхностью бурта и наконечника инструмента и величина тепловыделения в месте контакта их со свариваемым металлом уменьшаются. Вследствие этого в зоне формирования неразъемного соединения не обеспечивается необходимый для качественного формирования шва объем пластифицированного металла или не достигается требуемый уровень его пластификации, что может привести к образованию внутренних дефектов в виде несплошностей (рис. 1, а) или поверхностных дефектов с лицевой стороны шва в виде несплавления (рис. 1, б). Кроме того, в результате уменьшения глубины проникновения наконечника инструмента в свариваемый металл и выделяемого при его трении тепла, в корневой части шва также могут возникать дефекты в виде несплавления (рис. 1, в). К ухудшению качества сварных соединений может приводить и чрезмерное ($>0,15$ мм) заглубление инструмента. Так, при сварке пластичных низколегированных алюминиевых сплавов (АМцН, АД33, АМг2М) на лицевой поверхности шва могут образовываться поверхностные дефекты в виде грата (рис. 1, в), а при сварке более прочных сплавов — внутренние несплошности, обусловленные перегревом металла (рис. 1, д). Поэтому для обеспечения качественного формирования швов необходимо погружать инструмент в свариваемый металл на глубину 0,10...0,15 мм и в процессе сварки за счет осевого усилия прижатия поддерживать его в таком положении.

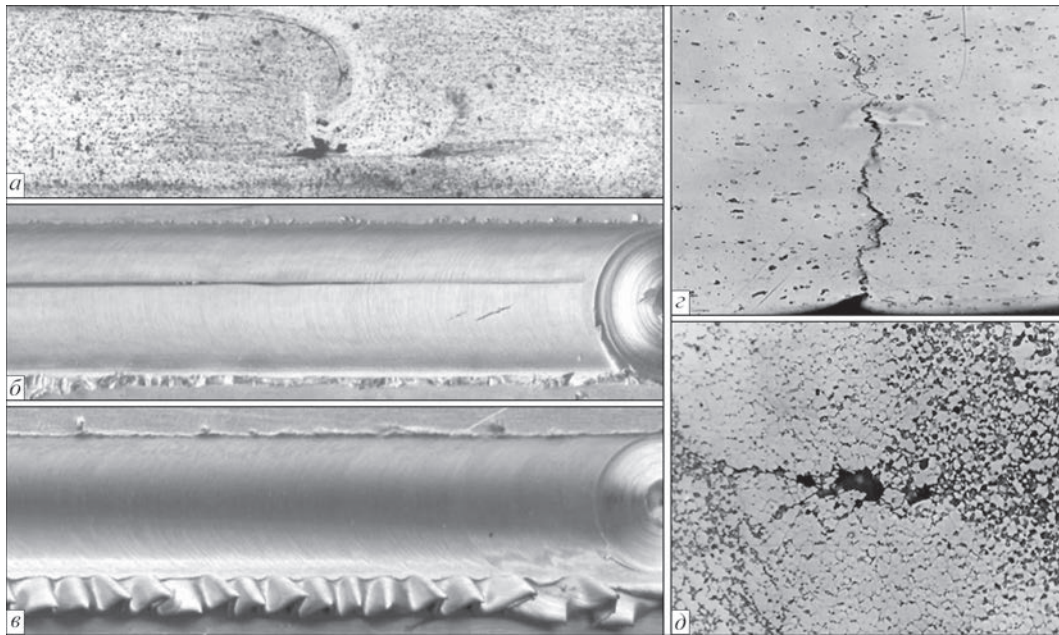


Рис. 1. Характерные дефекты, образующиеся в швах, полученных сваркой трением с перемешиванием: *a, d* — внутренние несплошности; *b* — несплавление с лицевой поверхности шва; *в* — грат на лицевой поверхности шва; *з* — несплавление в корневой части шва (*a* — $\times 15$; *b, в* — $\times 2$; *з* — $\times 300$; *d* — $\times 500$)

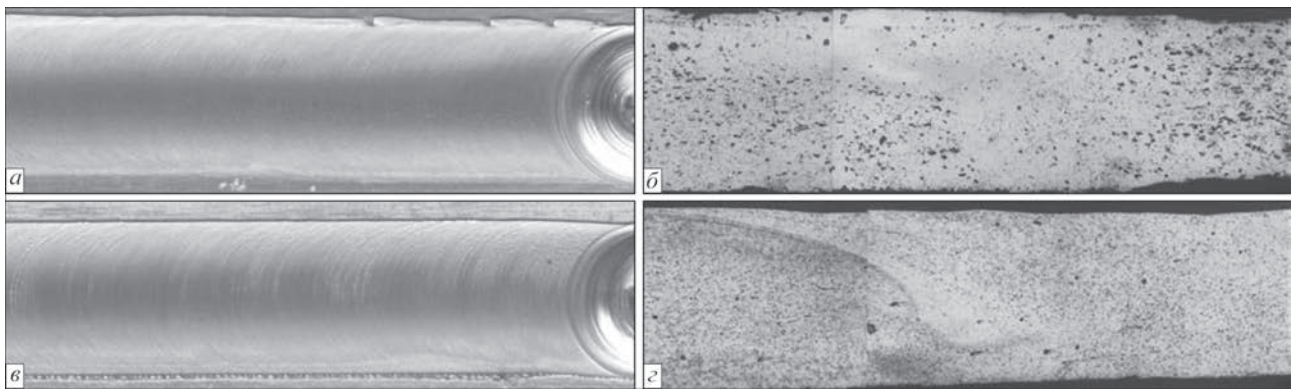


Рис. 2. Внешний вид (*a, в*; $\times 2$) и поперечные макрошлифы (*б, з*; $\times 12$) швов алюминиевых сплавов АМцН (*a, б*) и АМг2М (*в, з*) толщиной 2 мм, полученных СТП при скоростях сварки 38 и 32 м/ч, соответственно

Условия пластического деформирования металла в зоне образования неразъемного соединения определяются температурой его нагревания и скоростью деформирования, которые зависят от частоты вращения инструмента и скорости его линейного перемещения вдоль стыка. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что качественное формирование швов при сварке трением с перемешиванием различных алюминиевых сплавов обеспечивается при разных значениях этих параметров. Так, при частоте вращения инструмента $N = 1420$ об/мин пластичные низколегированные алюминиевые сплавы успешно свариваются при достаточно высоких скоростях сварки (рис. 2).

Для получения качественных соединений на более прочных алюминиевых сплавах, содержащих значительное количество легирующих и модифицирующих элементов, необходимо снижать скорость сварки. Например, в швах алюми-

но-литиевого сплава 1460 внутренние дефекты в виде пустот, обусловленные недостаточным объемом пластифицированного металла в зоне формирования неразъемного соединения, образуются при перемещении инструмента вдоль шва со скоростью более 20 м/ч, а в швах сплава 1201 — более 14 м/ч (рис. 3).

При повышении частоты вращения инструмента до 2880 об/мин тепловыделение в зоне образования неразъемного соединения возрастает, что позволяет увеличить в два раза скорость линейного перемещения инструмента без ухудшения качества швов. Учитывая такую взаимосвязь между отмеченными параметрами процесса, использовали соотношение $v_{св}/N$, выражающее длину линейного перемещения инструмента вдоль стыка за один его оборот. Проведенные экспериментальные исследования позволили определить оптимальные значения этого соотношения в зависимости от суммарного содержания легирующих и

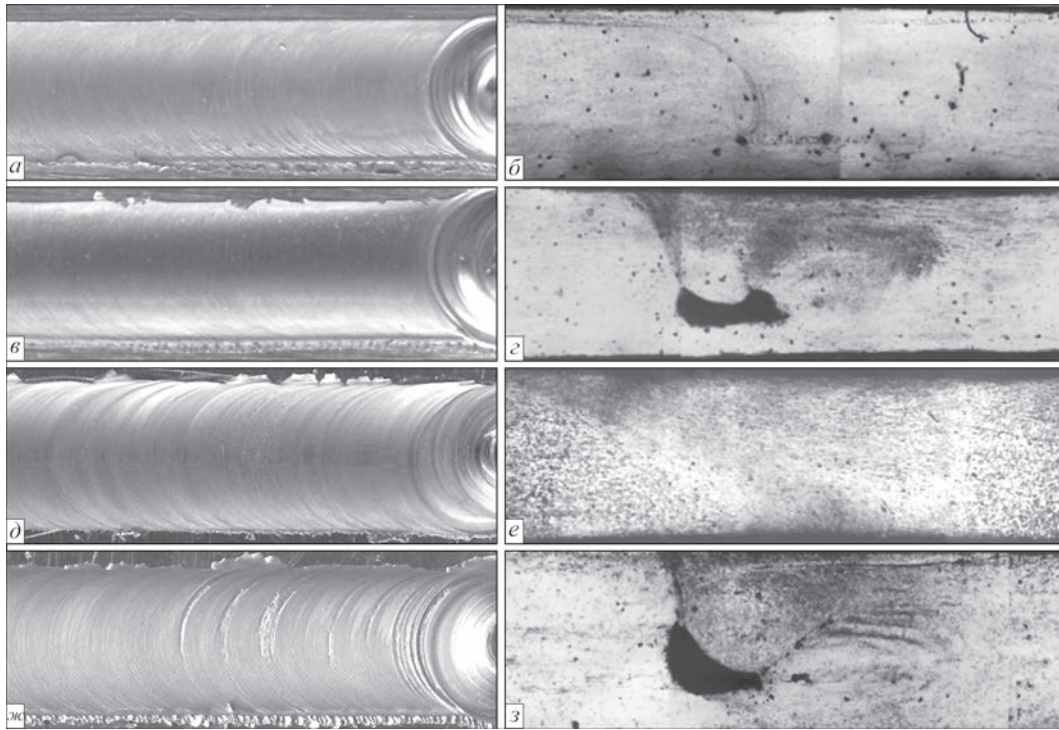


Рис. 3. Внешний вид (а, в, д, ж; $\times 2$) и поперечные макрошлифы (б, з, е, з; $\times 12$) швов алюминиевых сплавов 1460 (а–е) и 1201 (д–з) толщиной 2 мм, полученных СТП при скоростях сварки 8 м/ч (а, б, д, е), 24 м/ч (в, з) и 18 м/ч (ж, з)

модифицирующих элементов в свариваемых алюминиевых сплавах (рис. 4).

Установлено, что при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава АМцН, содержащего около 2,2 % легирующих и модифицирующих элементов, качественное формирование швов обеспечивается при величине соотношения $v_{св}/N$ в пределах 0,094...0,481 мм/об, т. е., при частоте вращения инструмента 1420 об/мин скорость сварки может изменяться в пределах 8...41 м/ч. Для сплава АД33, в котором содержание таких элементов составляет около 3,2 %, диапазон оптимальных соотношений $v_{св}/N$ сокращается до 0,094...0,423 мм/об, что при упомянутой выше ча-

стоте вращения инструмента позволяет успешно выполнять сварку на скоростях 8...36 м/ч. Качественное формирование швов на сплаве АМг2М, содержащем еще большее количество легирующих и модифицирующих элементов (4 %), достигается при величине соотношения $v_{св}/N$ в пределах 0,094...0,376 мм/об или при $v_{св} = 8...32$ м/ч.

Для более прочных алюминиевых сплавов, содержащих значительное количество легирующих и модифицирующих элементов, диапазон оптимальных соотношений $v_{св}/N$, при которых обеспечивается качественное формирование швов, становится значительно уже. Так, для сплава 1460, в состав которого кроме алюминия входит около 6,2 % других элементов, он составляет 0,070...0,233 мм/об, т. е. при частоте вращения инструмента 1420 об/мин скорость сварки должна находиться в пределах 6...20 м/ч, а при 2880 об/мин — 12...40 м/ч. На сплаве АМг5М, содержащем 7,2 % легирующих и модифицирующих элементов, качественное формирование швов обеспечивается при $v_{св}/N = 0,058...0,187$ мм/об или при скоростях сварки 5...16 и 10...32 м/ч, когда частота вращения инструмента составляет 1420 и 2880 об/мин соответственно. Еще более легированный сплав 1201, содержащий кроме алюминия 7,7 % других элементов, удается успешно сваривать при величине линейного перемещения инструмента за один его оборот в пределах 0,047...0,163 мм, что соответствует скоростям сварки 5...14 м/ч при частоте вращения инструмента 1420 об/мин и 10...28 м/ч при 2880 об/мин.

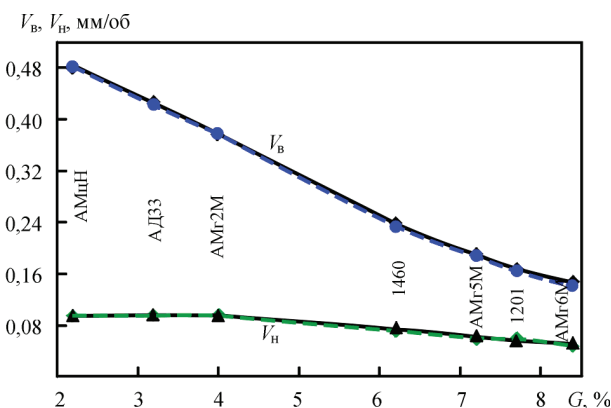


Рис. 4. Диапазон оптимальных соотношений скоростей сварки и частот вращения инструмента при СТП алюминиевых сплавов с различным содержанием легирующих и модифицирующих элементов и ограничивающие его аппроксимированные кривые ($N = 1420...2880$ об/мин)

Для сплава АМг6М, содержащего около 8,4% легирующих и модифицирующих элементов, оптимальное соотношение $v_{св}/N$ находится в диапазоне 0,047...0,140 мм/об, т. е. скорость сварки может изменяться в пределах 4...12 м/ч при частоте вращения инструмента 1420 об/мин или 8...24 м/ч при 2880 об/мин.

Полученные эмпирические кривые, ограничивающие диапазон оптимальных соотношений между длиной линейного перемещения инструмента за один его оборот и суммарным содержанием легирующих и модифицирующих элементов в сплаве, аппроксимировали степенными функциями. Для кривой, ограничивающей верхнюю границу этого диапазона, такая функция будет выражаться следующей формулой:

$$V_B(G) = V_{B0}[1,46 - 0,08G/G_0 - 0,541(G/G_0)^2 + 0,16(G/G_0)^3], \quad (1)$$

где $V_B(G)$ — максимально допустимая величина линейного перемещения инструмента за один его оборот, при которой обеспечивается качественное формирование швов, мм/об; $V_{B0} = 0,376$ мм/об — максимально допустимая величина линейного перемещения инструмента за один его оборот для сплава АМг2М; $G_0 = 4\%$ — суммарное содержание легирующих и модифицирующих элементов в алюминиевом сплаве АМг2М; G — суммарное содержание легирующих и модифицирующих элементов в свариваемом алюминиевом сплаве, % (в диапазоне 2,2...8,4%).

Для кривой, ограничивающей нижнюю границу указанного диапазона, аппроксимированную зависимость можно выразить такой формулой:

$$V_H(G) = V_{H0}[0,64 + 1,12G/G_0 - 0,972(G/G_0)^2 + 0,197(G/G_0)^3], \quad (2)$$

где $V_H(G)$ — минимально допустимая величина линейного перемещения инструмента за один его оборот, при которой обеспечивается качественное формирование швов, мм/об; $V_{H0} = 0,094$ мм/об — минимально допустимая величина линейного перемещения инструмента за один его оборот для сплава АМг2М.

Представленные на графике (см. рис. 4) сплошными линиями кривые, полученные с использованием аппроксимированных формульных зависимостей, практически совпадают с пунктирными кривыми, построенными по результатам экспериментальных исследований. Поэтому при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов, содержащих суммарное количество легирующих и модифицирующих элементов в пределах 2,2...8,4%, диапазон оптимальных соотношений между скоростями линейного перемещения и частотами вращения инструмента, при которых обе-

спечивается качественное формирование швов, можно определять с помощью приведенных выше формул.

Увеличение или уменьшение установленных оптимальных соотношений $v_{св}/N$ для алюминиевых сплавов, содержащих определенное количество легирующих и модифицирующих элементов, приводит к образованию дефектов в швах. Превышение установленной максимально допустимой скорости перемещения инструмента за один его оборот на 10...20% приводит к появлению в швах внутренних несплошностей (см. рис. 1, а), обусловленных недостаточной пластификацией металла в зоне сварки. А при дальнейшем его увеличении с лицевой стороны шва образуются поверхностные дефекты в виде несплавлений (см. рис. 1, б).

Снижение соотношения $v_{св}/N$ ниже установленного минимально допустимого значения при сварке пластичных алюминиевых сплавов с небольшим содержанием легирующих и модифицирующих элементов (АМцН, АД33, АМг2М) приводит к образованию на лицевой поверхности швов дефектов в виде грата (см. рис. 1, в). При сварке остальных сплавов уменьшение минимально допустимой скорости перемещения инструмента за один его оборот на 10...20% вызывает появление участков перегретого металла на лицевой поверхности швов (рис. 5). А при дальнейшем его уменьшении в швах образуются внутренние не-

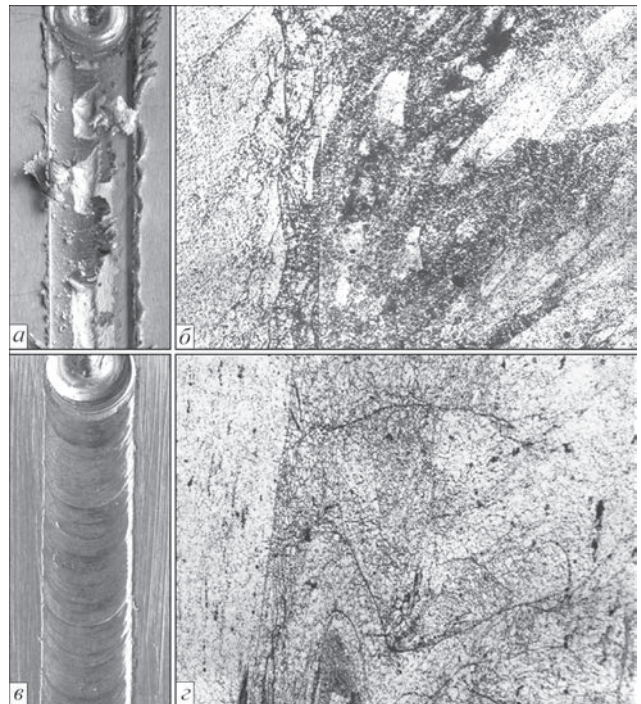


Рис. 5. Внешний вид (а, в; $\times 2$) и микроструктура (б, з; $\times 125$) лицевой поверхности швов, полученных при сварке трением с перемешиванием сплава 1420 толщиной 1,8 мм: а, б — шов перегретый; в, з — нормальный

площности, обусловленные перегревом металла (см. рис. 1, д).

Выводы

1. Качественное формирование швов при сварке трением с перемешиванием тонколистовых (0,8...3,0 мм) алюминиевых сплавов различных систем легирования можно обеспечить при погружении инструмента в свариваемый металл на глубину 0,10...0,15 мм за счет правильного выбора частоты вращения инструмента и скорости сварки.

2. Пластичные низколегированные алюминиевые сплавы успешно свариваются при достаточно высоких скоростях сварки. При частоте вращения инструмента $N = 1420$ об/мин скорость его линейного перемещения для сплава АМцН может изменяться в пределах 8...41 м/ч, для сплава АД33 — 8...36 м/ч и для сплава АМг2М — 8...32 м/ч. Для получения качественных соединений на более прочных алюминиевых сплавах, содержащих значительное количество легирующих и модифицирующих элементов, необходимо снижать скорость сварки.

3. Диапазон оптимальных соотношений скоростей сварки и частот вращения инструмента при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов зависит от суммарного содержания в них легирующих и модифицирующих элементов. При суммарном содержании их в сплаве 2,2 % (сплав АМцН) величина линейного перемещения инструмента за один его оборот может изменяться в достаточно широких пределах от 0,094 до 0,423 мм. А для более прочных высоколегированных сплавов диапазон ее изменения сужается до 0,047...0,163 мм при содержании 7,7 % (сплав 1201) таких элементов в свариваемом сплаве и до 0,047...0,140 мм при их содержании 8,4 % (сплав АМг6М). Отклонение указанных параметров от оптимального диапазона приводит к образованию характерных внутренних и поверхностных дефектов, обусловленных недостаточной пластификацией или перегревом свариваемого материала.

4. Построенные по результатам экспериментальных исследований кривые, ограничивающие диапазон оптимальных соотношений скоростей сварки и частот вращения инструмента, аппроксимированы формульными зависимостями в виде степенных функций, позволяют рассчитать необходимые скорости вращения и перемещения

инструмента для любого алюминиевого сплава, содержащего 2,2...8,4 % легирующих и модифицирующих элементов.

Список литературы/References

1. Lahti K. (2003) FSW – possibilities in Shipbuilding. *Svetsaren*, **1**, 6–8.
2. Kuriyama T. (2008) Advantages of Aluminum Alloy Rolling Stocks and Transition of Carbody Structures. *Journal of Light Metal Welding and Construction*, **9**, 418–421.
3. Arbegast W.J. (2006) Friction Stir Welding After a Decade of Development. *Welding Journal*, **3**, 28–35.
4. Ding J., Carter R., Lawless K. et al. (2006) Friction Stir Welding Flies High at NASA. *Ibid*, **3**, 54–59.
5. Okamura H., Aota K., Ezumi M. (2000) Friction Stir Welding of Aluminum Alloy and Application to Structure. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, **4**, 166–172.
6. Defalco J. (2006) Friction stir welding vs. fusion welding. *Welding Journal*, **3**, 42–44.
7. Lanciotti A., Vitali F. (2003) Characterization of friction welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates. *Welding International*, **8**, 624–630.
8. Kulekci M.K. (2003) Mechanické vlastnosti spojov hliníkovej zliatiny AlCu4SiMg vyhotovených trecím zvaraním premiešaním. *Zvaranie–Svařování*, **5** **6**, 104–107.
9. Pietras A., Zadroga L., Lomozik M. (2004) Characteristics of welds formed by pressure welding incorporating stirring of the weld material (FSW). *Welding International*, **1**, 5–10.
10. Oosterkamp A., Oosterkamp L., Nordeide A. (2004) «Kissing Bond» Phenomena in Solid-State Welds of Aluminum Alloys. *Welding Journal*, **8**, 225–231.
11. Покляцкий А.Г. (2008) Характерные дефекты при сварке трением с перемешиванием тонколистовых алюминиевых сплавов и основные причины их образования. *Автоматическая сварка*, **6**, 48–52.
12. Poklyatsky, A.G. (2008) Characteristic defects in FSW of sheet aluminium alloys and main causes for their formation. *The Paton Welding J.*, **6**, 39–43.
13. Shinoda T. (2002) Effect of Tool Angle on Metal Flow Phenomenon in Friction Stir Welds. *6th International conference on trends in welding research. Georgia, USA*.
14. Okamura H., Aota K., Takai H. et al. (2003) Point of Application for FSW. *Welding Technology*, **5**, 60–69.
15. Colegrove P.A., Shercliff H.R. (2003) Experimental and numerical analysis of aluminium alloy 7075-T7351 friction stir welds. *Science and Technology of Welding and Joining*, **5**, 360–368.
16. Enomoto M. (2003) Friction Stir Welding: research and industrial applications. *Welding International*, **5**, 341–345.
17. Hassan A.A., Prangnell P.B., Norman A.F. et al. (2003) Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds. *Ibid*, **4**, 257–268.
18. Рязанцев В.И., Мацнев В.Н., Конкевич В.Ю. (2004) Сварка трением с перемешиванием деформируемых и литейных алюминиевых сплавов. *Авиационная промышленность*, **4**, 33–36.
19. Ryazantsev, V.I., Matsnev, V.N., Konkevich, V.Yu. (2004) Friction stir welding of wrought and cast aluminium alloys. *Aviats. Promyshlennost*, **4**, 33–36 [in Russian].
20. Іщенко А.Я., Покляцький А.Г. Заявник і патентовласник ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. № u201005315. (2010) *Інструмент для зварювання третям з перемішуванням алюмінієвих сплавів*. Україна Пат. 54096, МПК B23K 20/1.
21. Ishchenko, A.Ya., Poklyatsky, A.G. (2010) *Tool for friction stir welding of aluminium alloys*. Ukraine Pat. 54096, Int. Cl. B23K 20/12, No. u 201005315 [in Ukrainian].

ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ ТОНКОЛИСТОВИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

А.Г. Покляцький

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Визначено оптимальні параметри режимів зварювання тертям з перемішуванням широко використовуваних при виготовленні зварних конструкцій алюмінієвих сплавів різних систем легування товщиною 0,8...3,0 мм. Показано, що якісне формування швів можна забезпечити при зануренні інструменту в зварюваний метал на глибину 0,10...0,15 мм за рахунок правильного вибору частоти обертання інструменту і швидкості зварювання. Встановлено взаємозв'язок між сумарним вмістом легуючих і модифікуючих елементів у зварному алюмінієвому сплаві, швидкістю зварювання і частотою обертання інструменту. Визначено діапазон оптимальних співвідношень, які визначають довжину лінійного переміщення інструменту уздовж стику за один його оборот, в якому забезпечується якісне формування швів тонколистових алюмінієвих сплавів АМцН, АД33, АМГ2М, 1460, АМГ5М, 1201 і АМГ6М. Отримано формули, що відображають залежності у вигляді степеневих функцій, що обмежують цей діапазон і дозволяють розрахувати необхідні швидкості обертання і переміщення інструменту для будь-якого алюмінієвого сплаву, що містить 2,2...8,4 % легуючих і модифікуючих елементів. Показані характерні дефекти, які утворюються в швах при відхиленні вказаних параметрів від оптимального діапазону. Бібліогр. 18, рис. 5.

Ключові слова: алюмінієві сплави, зварювання тертям з перемішуванням, швидкість обертання інструменту, швидкість зварювання, характерні дефекти

PREDICTION OF PARAMETERS OF FRICTION STIR WELDING OF SHEET ALUMINIUM ALLOYS

A.G. Poklyatskii

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Optimum parameters of the modes of friction stir welding of 0.8–3.0 mm thick aluminium alloys widely used in fabrication of welded structures were determined. It is shown that sound formation of welds can be ensured at tool immersion into the metal being welded to the depth of 0.10–0.15 mm due to correct selection of the frequency of tool rotation and welding speed. A relationship is established between the total content of alloying and modifying elements in the aluminium alloy being welded, welding speed and frequency of tool rotation. A range of optimum relationships was determined, showing the length of the tool linear movement along the butt during one rotation, when sound formation of welds of sheet aluminium alloys AMtsN, AD33, AMg2M, 1460, AMg5M, 1201 and AMg6M is provided. Formulas were derived, which express the dependencies in the form of power functions, limiting this range and allowing calculation of the required speeds of tool rotation and displacement for any aluminium alloy, containing 2.2–8.4% of alloying and modifying elements. Characteristic defects, forming in welds at deviation of the above parameters from the optimum range, are shown. 18 Ref., 5 Fig.

Keywords: aluminium alloys, friction stir welding, tool rotation speed, welding speed, characteristic defects

Поступила в редакцію 19.05.2019

Лащенко Г.И., Никитюк Ю.А. Расширение технологических возможностей сварочного производства. Киев, 2019. — 360 стр.

Рассмотрена роль сварочного производства в развитии национальной экономики. Проанализировано состояние и пути трансформации украинской экономики. Освещены тенденции и тренды развития современного сварочного производства. Изложены основы разработки технологии сварки. Дана характеристика способов и приемов сварки плавлением. Проанализировано использование принципа комбинирования для расширения технологических возможностей заготовительных, сборочных и сварочных операций.

Приведены технологические возможности сварки трением с перемешиванием и родственных процессов. Освещены особенности малозатратных технологий послесварочной обработки металлоконструкций с помощью вибронгружения и поверхностного пластического деформирования.

Для инженерно-технических работников, занятых в сварочном производстве. Может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам сварочных специальностей вузов.

Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала «Автоматическая сварка» (тел. 200-82-77).

