

УДК 621.791/052.4/1:669.715

**ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ
ТОНКОЛИСТОВЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ***канд. техн. наук А.Г. ПОКЛЯЦКИЙ**(Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев)*

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 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. 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, АМ2М, 1460, АМ25М, 1201 и АМ26М. Получены формульные 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.

Введение. 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 даёт 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 образованию 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, величина погружения бурта инструмента и глубина 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 борт 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, 1460 и Д16 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 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 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 несплавлений на поверхностях сварных соединений определяли с помощью визуального контроля. 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 её ($< 0,10$ 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 поверхностные 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.

Условия пластического деформирования металла в зоне образования неразъемного соединения определяются температурой его нагрева 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.

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

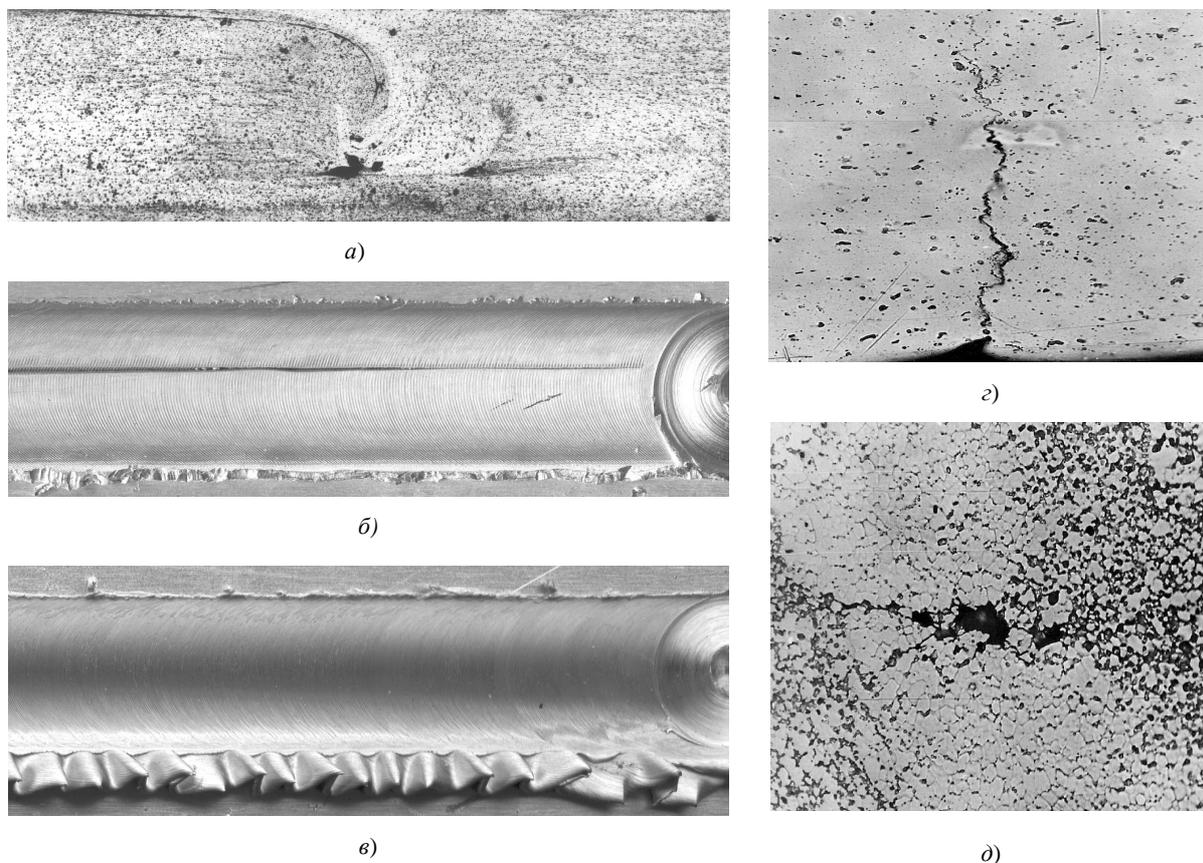


Рис. 1. Характерные дефекты, образующиеся в швах, полученных сваркой трением с перемешиванием:
 а ($\times 15$), д ($\times 500$) – внутренние несплошности; б ($\times 2$) – несплавление с лицевой поверхности шва;
 в ($\times 2$) – грат на лицевой поверхности шва; з ($\times 300$) – несплавление в корневой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

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 модифицирующих элементов в свариваемых алюминиевых сплавах (рис. 2).

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. То есть 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 вышеупомянутой частоте 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. То есть 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, удастся 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. 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. То есть 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.

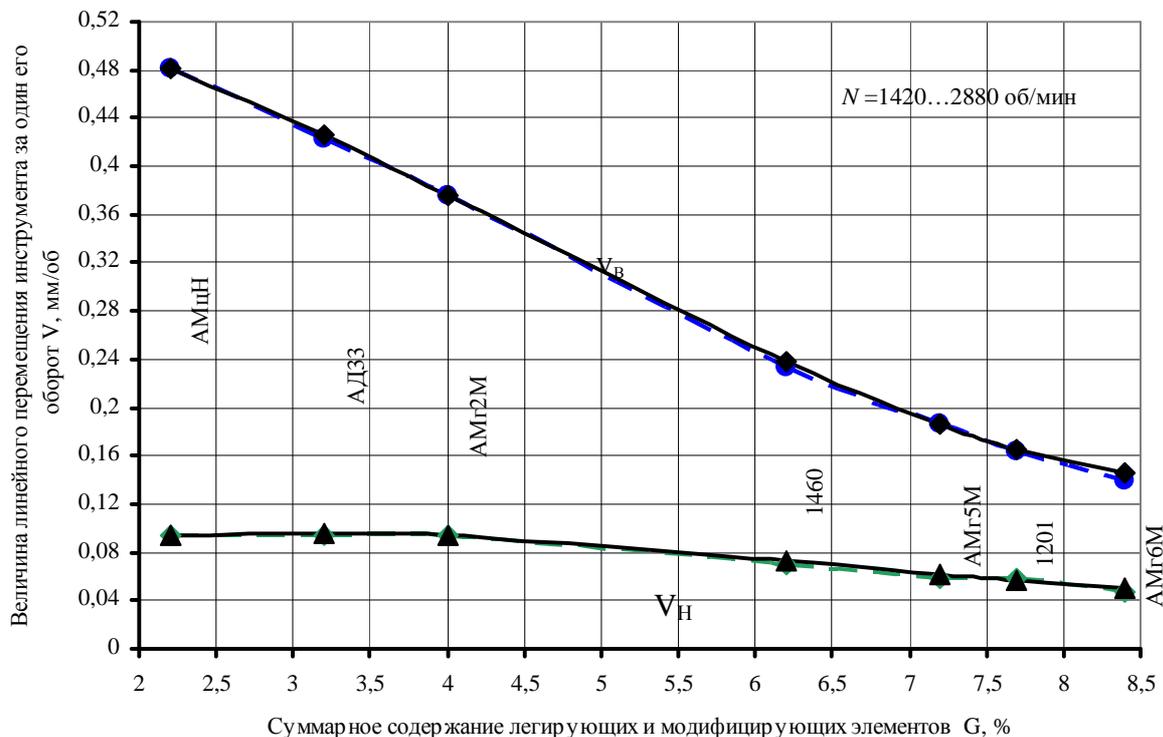


Рис. 2. Диапазон оптимальных соотношений скоростей сварки и частот вращения инструмента при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов с различным содержанием легирующих и модифицирующих элементов и ограничивающие его аппроксимированные кривые

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 следующим образом:

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

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 – суммарное содержание легирующих и модифицирующих элементов в алюминиевом сплаве АМг2М ($G_0 = 4$ %); 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 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. 2) 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 обеспечивается 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, вызывает образование 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 графа (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. А при дальнейшем его уменьшении в швах образуются внутренние несплошности, 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 за счет правильного выбора глубины погружения инструмента в свариваемый металл, частоты вращения инструмента и скорости его линейного перемещения вдоль стыка.

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, которые позволяют рассчитать необходимые скорости вращения и перемещения инструмента для любого алюминиевого сплава, содержащего 2,2...8,4 % легирующих и модифицирующих элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lahti, K. FSW – possibilities in Shipbuilding / K. Lahti // Svetsaren. – 2003. – № 1. – P. 6–8.
2. Kuriyama, T. Advantages of Aluminum Alloy Rolling Stocks and Transition of Carbonyl Structures / T. Kuriyama // Journal of Light Metal Welding and Construction. – 2008. – № 9. – P. 418–421.
3. Arbegast, W.J. Friction Stir Welding After a Decade of Development / W.J. Arbegast // Welding Journal. – 2006. – № 3. – P. 28–35.
4. Friction Stir Welding Flies High at NASA / J. Ding [et al.] // Welding Journal. – 2006. – № 3. – P. 54–59.
5. Okamura, H. Friction Stir Welding of Aluminum Alloy and Application to Structure / H. Okamura, K. Aota, M. Ezumi // Journal of Japan Institute of Light Metals. – 2000. – № 4. – P. 166–172.
6. Defalco, J. Friction stir welding vs. fusion welding / J. Defalco // Welding Journal. – 2006. – № 3. – P. 42–44.

7. Lanciotti, A. Characterization of friction welded joints in aluminium alloy 6082-T6 plates / A. Lanciotti, F. Vitali // *Welding International*. – 2003. – № 8. – P. 624–630.
8. Kulekci, M.K. Mechanické vlastnosti spojov hliníkovej zliatiny AlCu4SiMg vyhotovených trecím zvaraním premiešaním / M.K. Kulekci // *Zvaranie – Svařování*. – 2003. – № 5–6. – P. 104–107.
9. Pietras, A. Characteristics of welds formed by pressure welding incorporating stirring of the weld material (FSW) / A. Pietras, L. Zadroga, M. Lomozik // *Welding International*. – 2004. – № 1. – P. 5–10.
10. Oosterkamp, A. “Kissing Bond” Phenomena in Solid-State Welds of Aluminum Alloys / A. Oosterkamp, L. Oosterkamp, A. Nordeide // *Welding Journal*. – 2004. – № 8. – P. 225–231.
11. Покляцкий, А.Г. Характерные дефекты при сварке трением с перемешиванием тонколистовых алюминиевых сплавов и основные причины их образования / А.Г. Покляцкий // *Автоматическая сварка*. – 2008. – № 6. – С. 48–52.
12. Shinoda, T. Effect of Tool Angle on Metal Flow Phenomenon in Friction Stir Welds / T. Shinoda // 6th International conference on trends in welding research, Georgia, USA. – 2002. – April.
13. Point of Application for FSW / H. Okamura [et al.] // *Welding Technology*. – 2003. – № 5. – P. 60–69.
14. Colegrove, P.A. Experimental and numerical analysis of aluminium alloy 7075-T7351 friction stir welds / P.A. Colegrove, H.R. Shercliff // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2003. – № 5. – P. 360–368.
15. Enomoto, M. Friction Stir Welding: research and industrial applications / M. Enomoto // *Welding International*. – 2003. – № 5. – P. 341–345.
16. Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds / A.A. Hassan [et al.] // *Science and Technology of Welding and Joining*. – 2003. – № 4. – P. 257–268.
17. Рязанцев, В.И. Сварка трением с перемешиванием деформируемых и литейных алюминиевых сплавов / В.И. Рязанцев, В.Н. Мацнев, В.Ю. Конкевич // *Авиационная промышленность*. – 2004. – № 4. – С. 33–36.
18. Інструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів: пат. 54096 Україна, МПК В23К 20/12 / Іщенко А.Я., Покляцький А.Г.; заявник і патентовласник ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. – № u201005315; заявл. 30.04.2010; опубл. 25.10.2010 // Бюл. № 20.

Поступила 23.12.2014

PARAMETERS OF FSW PROCESS OF THIN SHEET ALUMINIUM ALLOYS

A. POKLYATSKY

Optimum parameters of modes of friction stir welding, which are widely used in manufacture of welded structures of 0.8...0.3 mm thickness aluminium alloys of different alloying systems, were determined. It is shown that quality weld formation in friction stir welding of thin sheet aluminium alloys can be provided due to correct selection of depth of tool immersion in metal being welded, tool rotation frequency and rate of its linear movement along the joint or welding rate. Relationship was determined between total content of alloying and modifying elements in the aluminium alloy being welded, welding rate and tool rotation frequency. A range of optimum relationships, expressing a length of linear movement of tool along the joint per its one revolution, which provides quality formation of the welds of thin sheet aluminium alloys AMtsN, AD33, AMg2M, 1460, AMg5M, 1201 and AMg6M, was determined. Formula dependencies in form of power functions, limiting this range and allowing calculation of necessary rates of revolution and tool movement for any aluminium alloy, containing 2.2...8.4 % of alloying and modifying elements, were received.