



СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ (Обзор)

Чл.-кор. НАН Украины А. Я. ИЩЕНКО, С. В. ПОДЪЕЛЬНИКОВ, инж., А. Г. ПОКЛЯЦКИЙ, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены современное состояние сварки трением с перемешиванием, конструкции рабочего инструмента, типы соединений при использовании данного способа сварки, особенности формирования соединений различных алюминиевых сплавов и их свойства. Описаны основные области применения сварки трением с перемешиванием.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы, сварочный инструмент, структура сварных соединений, свойства швов, области применения, сварные конструкции

Способ сварки трением с перемешиванием (СТП) был разработан Британским институтом сварки (TWI) в 1991 г. [1]. Интенсивное изучение этого процесса с целью совершенствования технологии и создания нового оборудования позволило найти его эффективное применение при производстве высокотехнологичных изделий в таких отраслях, как вагоно-, судо-, авиастроение и многих других. СТП, относящийся к процессам соединения материалов в твердой фазе, лишен недостатков, присущих процессам сварки с расплавлением металла. Исследователи данного процесса считают, что если 10 % общего объема сварных соединений в США заменить СТП, то будет достигнуто на 500 млн фунтов/год меньше выделений парникового газа. Расчетная экономическая выгода промышленности США от внедрения СТП в промышленное производство составляет 4,9 млрд дол. в год [2].

Сущность процесса заключается в следующем (рис. 1). Для сварки используют инструмент в форме стержня, состоящий из двух основных частей: заплечика или бурта (утолщенная) и наконечника (выступающая часть). Размеры этих конструктивных элементов выбирают в зависимости от толщины и материала свариваемых деталей. Длину наконечника устанавливают приблизительно равной толщине детали, подлежащей сварке. Диаметр заплечика может изменяться от 1,2 до 25 мм. Вращающийся с высокой скоростью инструмент в месте стыка вводится в соприкосновение с поверхностью заготовок таким образом, чтобы наконечник внедрился в заготовки на глубину, примерно равную их толщине, а заплечик коснулся их поверхности. После этого инструмент перемещается по линии соединения со скоростью сварки. В результате трения происходит нагрев

металла вплоть до пластического состояния, перемешивание его вращающимся инструментом и вытеснение в освобождающееся пространство позади движущегося по линии стыка инструмента. Объем, в котором формируется шов, ограничивается сверху заплечиком инструмента. По окончании сварки вращающийся инструмент выводят из стыка за пределы заготовки. В связи с асимметрией структуры швов в поперечном сечении сварных соединений, полученных СТП, принято различать сторону набегания, где направление вращения инструмента совпадает с направлением сварки, и противоположную сторону — отхода.

СТП в основном применяют для соединения материалов со сравнительно низкой температурой плавления, прежде всего алюминиевых [3] и магниевых сплавов [4]. Выполнена успешная сварка данным способом медных [5], никелевых и титановых сплавов [2], а также сталей [6]. С помощью СТП сваривают алюминиевые сплавы толщиной до 75 мм за один проход [7]. СТП позволяет получать нахлесточные соединения алюминиевых листов толщиной от 0,2 мм [8]. Скорость сварки сплава 6082 толщиной 5 мм может достигать 6 м/мин [9].

Основными параметрами процесса СТП являются: скорость сварки, частота вращения инструмента, усилия прижатия и перемещения инструмента, угол наклона инструмента, его размеры.

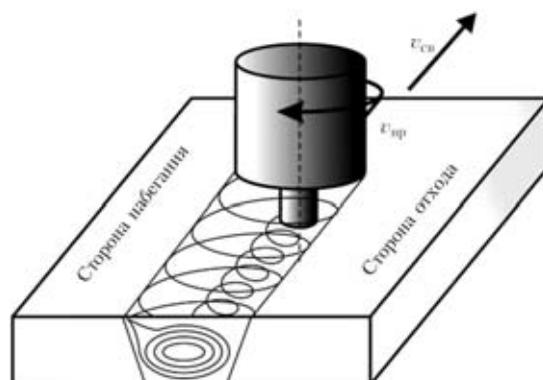


Рис. 1. Схема процесса СТП

Усилия прижатия и перемещения зависят от типа свариваемого материала, его толщины и скорости сварки. Сварка образцов из сплава 7010-T7651 толщиной 6,35 мм при изменении скорости сварки в диапазоне от 59 до 159 мм/мин и скорости вращения инструмента от 180 до 660 об/мин показала, что при увеличении скорости вращения возрастает тепловложение в металл и в сварном соединении формируется микроструктура с более однородными зернами [10]. При этом до определенного предела также повышаются прочностные и пластические свойства. При повышении скорости сварки необходимо увеличивать скорость вращения инструмента для достижения оптимальных условий. Однако для полного отсутствия дефектов, а также обеспечения всех необходимых свойств, надежности и технологичности следует строго выбирать режимы, оптимально подходящие для определенной продукции.

Большинство исследователей указывают на следующие преимущества СТП по сравнению с другими способами получения неразъемных соединений [11, 12]:

- сохранение в значительной мере свойств основного металла в зоне сварки по сравнению со способами сварки плавлением;

- отсутствие вредных испарений и ультрафиолетового излучения в процессе сварки;

- возможность получения бездефектных швов на сплавах, которые при сварке плавлением склонны к образованию горячих трещин и пористости в металле швов;

- отсутствие необходимости в применении присадочного материала и защитного газа, удаления поверхностных оксидов на кромках перед сваркой, а также шлака и брызг после сварки;

- отсутствие потерь легирующих элементов в металле шва.

Уровни выделений Cr, Cu, Mn, Cr⁺⁶ при СТП сталей по сообщению Rockwell Scientific (США) значительно ниже (< 0,03, < 0,03, < 0,02 и < 0,01 мг/мм³ соответственно), чем при аргонодуговой сварке (соответственно 0,25; 0,11; 1,88 и 0,02 мг/мм³) [2]. Сравнение затрат в производстве при использовании СТП и сварки плавящимся электродом (СПЭ) показало, что начальные капиталовложения при СТП более высокие, но с увеличением объемов производства применение СТП становится экономически выгоднее, чем дуговой сварки [11].

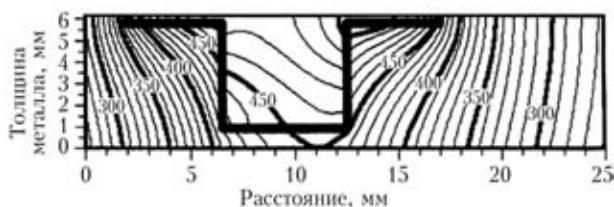


Рис. 2. Распределение температур в продольном сечении образца

Судя по экспериментальным результатам TWI, максимальная температура при СТП составляет около 70 % температуры плавления и для алюминия не превышает 550 °С. Тепловложение при СТП меньше, чем при аргонодуговой сварке примерно в 2 раза и для сплава 6N01-T5 толщиной 4 мм составляет соответственно 190 и 390 Дж/мм (скорость сварки 500 мм/мин) [13]. С помощью математического моделирования тепловых процессов при СТП в работе [14] построено распределение температур в свариваемой пластине (рис. 2). Более низкая температура металла зоны соединения при СТП по сравнению со СПЭ объясняется меньшим уровнем угловых деформаций в сварном соединении. При СТП угловая деформация равна 1/5...1/7 значений при СПЭ [12] (рис. 3).

Предполагается, что при СТП из-за невысокого уровня температур нагрева металла остаточные напряжения в нем низкие. Жесткое закрепление налагает большие ограничения на деформацию пластин, что препятствует сокращению металла при охлаждении зоны динамической рекристаллизации и зоны термического влияния (ЗТВ) в продольном и поперечном направлении, приводя к поперечным и продольным остаточным напряжениям. При СТП сплавов 2024-T3 и 6013-T6 обнаружено, что продольные остаточные напряжения выше поперечных (скорость сварки составляла 300...1000 мм/мин, скорость вращения инструмента 1000...2500 об/мин). Высокие растягивающие напряжения наблюдаются преимущественно в металле ЗТВ. При снижении скорости сварки и скорости вращения инструмента остаточные напряжения уменьшаются. Максимальные значения продольных растягивающих напряжений достигают 30...60 % предела текучести сварного соединения и 20...50 % предела текучести основного металла [15].

Макроструктура сварных соединений при СТП характеризуется особенностями, не свойственными швам, полученным способами сварки плавлением. Типичным для СТП является образование в центре соединения ядра с овальными концентрическими кольцами, различающимися структурой [16]. К ядру примыкает сложный профиль, который характерен для верхней части шва. Наличие овальных колец обусловлено особенностями перемешивания металла наконечником инструмента. В сварном соединении при СТП выделяют четыре зоны, которые схематически пред-



Рис. 3. Сравнение угловой деформации при СТП (нижний образец) и СПЭ (верхний) (алюминиевый сплав серии 6000, толщина 2 мм)



Рис. 4. Схема зон стыкового соединения, выполненного СТП (обозначения см. в тексте)

ставлены на рис. 4. Непосредственно к зоне *A* (основной металл) примыкает зона *B*, где металл заготовок остается недеформированным и изменяет свою структуру только под воздействием нагрева (ЗТВ). Зона *C*, где металл подвергается значительным пластическим деформациям и нагреву, названа зоной термомеханического влияния. Зона *D* — ядро соединения, где происходит динамическая рекристаллизация. Твердость металла уменьшается в направлении от основного металла к центру шва и минимальное значение достигается в металле ЗТВ (рис. 5). Снижение твердости в металле ЗТВ происходит в результате перестаривания, уменьшения плотности дислокаций либо за счет обоих этих механизмов.

О высоком уровне механических свойств сварных соединений сообщают многие исследователи. При СТП у сварного соединения сплава 6082-T6 $\sigma_B = 245$ МПа, тогда как у основного металла $\sigma_B = 317$ МПа. Для 6082-T4, состаренного после сварки, $\sigma_B = 308...310$ МПа. Испытания на усталость свидетельствуют о более высоком уровне механических свойств соединений при СТП по сравнению с аналогичными при аргонодуговой сварке [18].

Авторы работы [19] проводили исследования механических свойств соединений, полученных СТП сплава 5083 при криогенных температурах, что представляло интерес при подготовке производства емкостей для сжиженного водорода. Образцы толщиной 30 мм были сварены со скоростью 40 мм/мин. Исследования при 77 К в жидком азоте, при 20 К в жидком водороде и при 4 К в жидком гелии показали, что уровень свойств

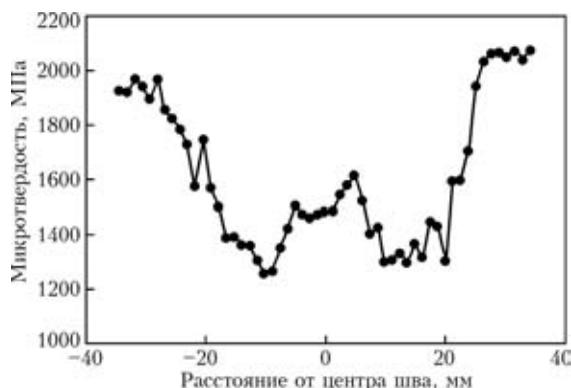


Рис. 5. Распределение твердости в зоне сварного соединения сплава 7075-T7351 [17]

соединений при СТП выше, чем при аргонодуговой сварке.

Проблемами СТП литейных алюминиевых сплавов занимались авторы работы [20]. В промышленном производстве литейные сплавы часто приходится сваривать с заготовками, получаемыми по способу экструдирования. Использовали сплавы ADC1 и A6061-T6 толщиной 4 мм. Результаты, полученные при СТП, сравнивали с аналогичными при аргонодуговой и лазерной сварке. Как видно из рис. 6, СТП обеспечивает лучшие свойства соединений. Предел прочности составляет 80 % прочности A6061-T6. При испытании на изгиб разрушение при СТП происходит по основному металлу. О положительных результатах СТП разнородных сплавов, а также алюминиевых сплавов со сталями сообщается в работе [21]. При СТП стали SS400 и сплава A5083 толщиной 2 мм предел прочности соответствовал 240 МПа, что составляет 86 % прочности алюминиевого сплава.

В качестве недостатка способа СТП авторы работ [2, 12] отмечают образование в конце шва отверстия, равного диаметру наконечника, что требует выведения шва за пределы рабочего сечения заготовки или заполнения отверстия после сварки с помощью других методов таких, как варка трением специальных пробок.

Совершенствование технологии и оборудования позволяет преодолеть существующие недостатки, а также расширить области применения способа. Хотя СТП применяется в основном для стыковых и нахлесточных швов, возможно также получение угловых, тавровых, точечных швов.

Точечную СТП можно реализовать двумя способами. Первый — точечная сварка погружением, запатентованная фирмой «Mazda» (Япония) в 2003 г. При этом вращающийся инструмент погружается в деталь, доводя металл в зоне соединения до пластического состояния и последующего перемешивания его под заплечиком. После этого инструмент поднимается, оставляя ха-

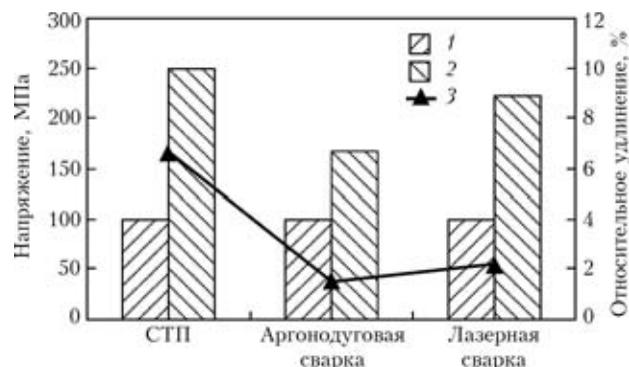


Рис. 6. Механические свойства сварного соединения, выполненного различными способами сварки: 1 — предел текучести; 2 — предел прочности; 3 — относительное удлинение

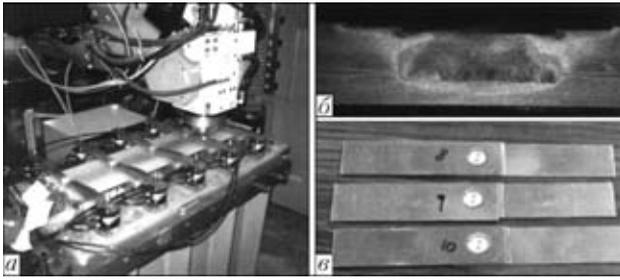


Рис. 7. Установка для точечной СТП (а), поперечное сечение (б) и внешний вид образцов (в)

рактерное углубление в детали. Второй способ — точечная СТП с заполнением шва, запатентованная GKSS в 2002 г. [2]. Для этого способа используют инструмент, у которого наконечник и заплечик имеют отдельные системы привода. Вращающийся инструмент опускается в деталь, при этом наконечник выдавливает и перемещивает находящийся под ним металл, а после его убирают. Металл под заплечиком заполняет углубление, и таким образом получается шов без отверстия (рис. 7).

Сварочный инструмент обычно изготавливается из инструментальных сталей H13 (AISI), SKD 61, SKD 11, SKH 57 (JIS) и нержавеющей мартенситной стали SUS 440C (JIS). При этом возможно использование составных инструментов, у которых наконечник изготовлен из кобальтового сплава MP159, а заплечик — из H13 [22]. Для сварки способом СТП сталей толщиной до 0,5'' MegaStir разработала инструмент из поликристаллического кубического нитрида бора. Его стойкость против разрушения выше и позволяет придать наконечнику форму, необходимую для благоприятного течения металла в зоне сварки (рис. 8). Инструмент по отношению к поверхности детали располагают под небольшим углом 2...3° [16, 23], что позволяет обеспечить наиболее высокие показатели качества.

Инструмент, одновременно выполняющий также роль подкладки соединяемых заготовок, приведен на рис. 9 [24]. В NASA разрабатывается



Рис. 8. Внешний вид инструмента из поликристаллического кубического нитрида бора [2]

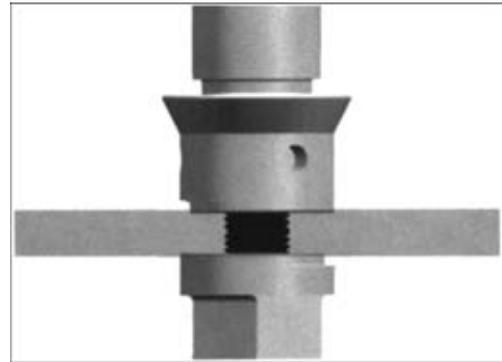


Рис. 9. Конструкция инструмента Bobbin Tool

саморегулирующийся инструмент, длина наконечника которого определяется силами, действующими на него. При отклонении нагрузки на наконечник от заданного значения происходит автоматическая корректировка его длины, что позволяет сваривать заготовки переменного сечения и избегать образования отверстия при выполнении кольцевых швов.

Для сварки алюминиевых сплавов значительной толщины разработаны семейства инструментов Whorl™ (рис. 10) и Triflute™ [25], которые позволяют выполнять сварку за один проход алюминиевых сплавов толщиной 50 мм. Новыми вариантами СТП являются технологии Re-Stir™, Skew-Stir™, Com-Stir™ [26]. Технология Re-Stir™ с переменным вращением инструмента по и против часовой стрелки позволяет исключить асимметрию шва, присущую традиционной СТП. По технологии Skew-Stir™ инструмент немного наклонен по отношению к шпинделю машины таким образом, что точка пересечения осей шпинделя и инструмента, получившая название фокусной, может располагаться над, под или в свариваемой заготовке в зависимости от свойств материала и параметров режима. Такая особенность позволяет получить при вращении инструмента в процессе сварки более широкий шов. Инструменты A-Skew™ и Flare-Triflute™ обеспечивают формирование более прочных нахлесточных соединений. Особенность технологии Com-Stir™ состоит в совмещении в процессе сварки враща-

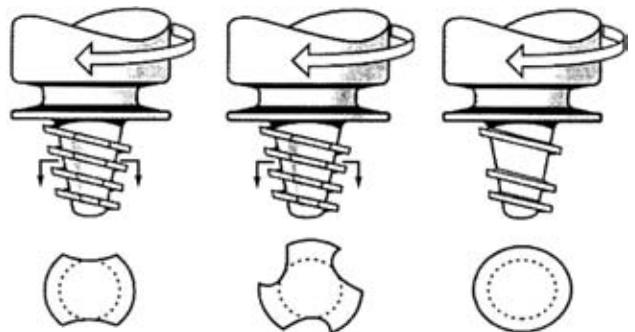


Рис. 10. Схемы вариантов конструкции рабочего инструмента Whorl™



Рис. 11. Соединения, выполненные на автомобиле Mazda RX-8 с помощью точечной СТП [2]

тельного и орбитального движений инструмента. В результате получают более широкие швы, что используется в основном при соединении разнородных материалов. Разработана система с двумя параллельными инструментами Twin-Stir™ [27].

Развитие новых технологий СТП продолжается. В Университете Миссури (Колумбия, США) занимаются разработкой СТП с сопутствующим дополнительным нагревом при пропускании тока через наконечник инструмента. Центр обработки и соединения передовых материалов (США) разрабатывает СТП с индукционным предварительным подогревом материала, что позволит увеличить скорость сварки, уменьшить силы, действующие на инструмент, и уменьшить его износ [2]. В работе [28] изучали возможность использования лазера для предварительного подогрева металла при СТП магниевых сплавов.

Благодаря небольшому количеству факторов, влияющих на процесс СТП, и достаточно простой конструкции оборудования, способ идеально подходит для автоматизации и роботизации [29]. Установка Tricsept 805 позволяет выполнять сварку алюминия толщиной до 10 мм.

СТП уже широко используется при производстве различных высокотехнологичных изделий. Фирмы «General Dynamics Land Systems» и «Edison Welding Institute» провели совместные работы, цель которых — обеспечить требуемые баллистические характеристики соединений броневых плит из алюминиевого сплава 2195-T87 для морских бронированных транспортеров. Сварка плит толщиной 31,8 мм способом СТП вместо аргонодуговой позволила получить приемлемые прочностные свойства соединений и более пластичные (в 2...3 раза) швы. В итоге сварные соединения (в том числе угловые) успешно прошли баллистические испытания [22].

Для предотвращения ухудшения свойств сверхпроводящей ниобий-титановой проволоки ее необходимо соединять с жестким элементом из



Рис. 12. Оборудование для СТП в вертикальном положении

чистого алюминия при температуре ниже 400 °С. Раньше для этого использовали низкотемпературную пайку, но паяные швы имели низкую прочность. СТП обеспечила требуемые свойства сварного соединения в жидком гелии [12].

С 2003 г. компания «Ford Motor Co.» (США) изготовила несколько тысяч автомобилей Ford GT, в которых СТП применена для сварки центрального отсека. В нем располагается изолированный от внутреннего отделения топливный бак [2]. СТП повышает точность размеров и на 30 % увеличивает прочность соединений по сравнению со сходными узлами при дуговой сварке в защитном газе. В работе [30] описан процесс изготовления точечной сваркой трением кузова автомобиля Mazda RX-8 (рис. 11). С 2003 г. было произведено свыше 100 тыс. автомобилей, двери которых выполнены с использованием точечной СТП [7]. Успешное применение данного способа позволяет планировать фирме выполнение подобных соединений на новом поколении автомобилей модели MX-5.

Активно занимаются изучением процесса СТП в аэрокосмической отрасли (рис. 12) [24]. В 2001 г. этот процесс внедрен в производство внешнего бака ракеты-носителя для возвращаемых космических кораблей. Технология предусматривает сварку восьми продольных швов на резервуаре из сплава 2195 для жидкого водорода и четырех продольных швов на резервуаре для жидкого кислорода, что составляет приблизительно 1/2 мили швов на каждом баке. Разрабатывается оборудование для ремонтной СТП в условиях космического вакуума. Концепция применения СТП основана на том, что высокая скорость вращения инструмента (30000 об/мин) позволит уменьшить усилия, необходимые для выполнения сварки.

Компания «Boeing» начала использовать СТП при производстве ракеты «Delta» II и III (рис. 13)

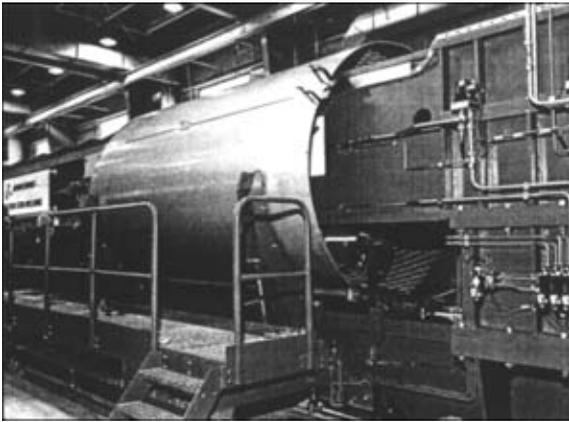


Рис. 13. Установка для СТП топливного бака ракеты «Delta» на предприятии «Boeing»

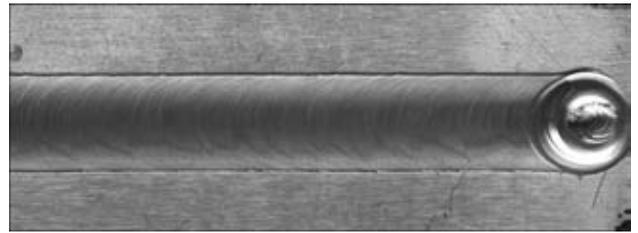


Рис. 16. Внешний вид шва, полученного СТП (алюминиевый сплав АМг6 толщиной 2 мм)

Механические свойства соединений алюминиевых сплавов, полученных СТП

Алюминиевый сплав	σ_B , МПа	α , град
АМг6	343	180
1420	362	96
1201	294	180
1460	325	180

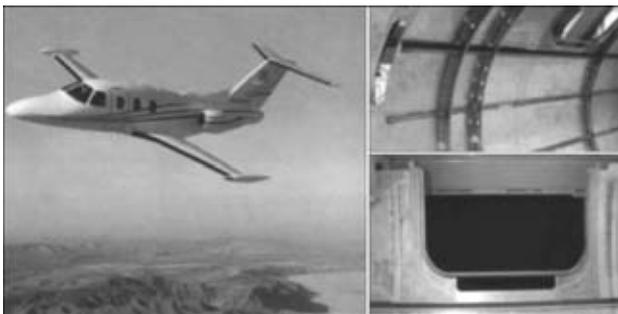


Рис. 14. Самолет «Eclipse 500» с узлами, изготовленными СТП

товления сварной конструкции. Производство ракет «Delta II» выросло с 8 до 17 ед. в год.

В [32] сообщается о работах по СТП оребренных панелей для крыла самолета из сплавов 2024, 7475, 7050 толщиной 4 мм. Высокое качество соединений обеспечено при использовании СТП на самолете «Airbus A350» и двух новых версиях A340 (A340-500 и A340-600) [2]. Компания «Eclipse Aviation» завершает сертификацию реактивного самолета бизнес-класса «Eclipse 500» с узлами, изготовленными способом СТП (рис. 14).

Таким образом, представленный обзор свидетельствует о том, что СТП успешно развивается и находит применение в различных отраслях промышленности. Большинство публикаций касаются сварки алюминиевых сплавов средней и сравнительно большой толщины. Следует отметить, что затруднения обычно возникают при соединении заготовок толщиной 0,5...3 мм, а также более 40 мм. В связи с этим, а также с возникающими осложнениями при обеспечении точности сборки тонкостенных заготовок под сварку в ИЭС им. Е. О. Патона проведены исследования процесса СТП на специальной экспериментальной установке (рис. 15). Работы выполнены на алюминиевых сплавах АМг6, 1201, 1460 толщиной 1,8...2,5 мм. На рис. 16 приведен внешний вид сварного соединения сплава АМг6, полученного способом СТП. Одновременно проверена эффективность сварочных инструментов с различными профилями рабочей части. Установлено, что соединения при данном способе сварки отличаются высоким уровнем механических свойств (коэффициент прочности сварных соединений составляет 0,7...0,9 % уровня прочности основного металла) (таблица).



Рис. 15. Внешний вид экспериментальной установки для СТП тонколистовых (1,8...2,5 мм) алюминиевых сплавов

[31]. Сварка выполняется на топливном баке длиной 8,4 м, на баке для жидкого кислорода длиной 12 м и на других конструкциях. СТП обеспечивает повышение качества (один дефект на 76,2 м шва) по сравнению с аргонодуговой сваркой (один дефект на 8,4 м шва), уменьшается время изго-

1. *Pat. 5460317 US*. Friction stir butt welding / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham et al. — Publ. 1995.
2. *Arbegas W. J.* Friction stir welding. After a decade of development // *Welding J.* — 2006. — **85**, № 3. — P. 28–35.
3. *Microstructures* and room temperature mechanical properties in friction-stir-welded joints of 7075 aluminum alloys / T. Ito, Y. Motohashi, A. Goloborodko et al. // *J. of the Jap. Weld. Soc.* — 2005. — **74**, № 3. — P. 9–13.
4. *Aritoshi M.* Friction stir welding of magnesium alloys sheets // *Ibid.* — 2005. — **74**, № 3. — P. 18–23.
5. *Nakata K.* Friction stir welding of copper and copper alloys // *Ibid.* — 2005. — **74**, № 3. — P. 14–17.
6. *Klingensmith S., Dupont J.N., Marder A.R.* Microstructural characterization of a double-sided friction stir weld on a super-austenitic stainless steel // *Welding J.* — 2005. — № 5. — P. 77–85.
7. *Martin J.* Pushing the boundaries — friction stir goes deeper than before // *TWI Connect.* — 2006. — Jan./Feb. — P. 1.
8. *Teh N. J.* Small joints make a big difference // *Ibid.* — 2006. — **143**, № 3. — P. 25–29.
9. *Эрикссон Л. Г., Ларссон Р.* Ротационная сварка трением — научные исследования и новые области применения // *Технология машиностроения.* — 2003. — № 6. — P. 81–84.
10. *Effect* of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminium alloy friction stir welds / A. A. Hassan, P. B. Prangnell, A. F. Norman et al. // *Sci. Technol. Weld. Joining.* — 2003. — **8**, № 4. — P. 257–268.
11. *Defalco J.* Friction stir welding vs. fusion welding // *Welding J.* — 2006. — **85**, № 3. — P. 42–44.
12. *Okamura H., Aota K., Ezumi M.* Friction stir welding of aluminium alloy and application to structure // *J. of Jap. Institute of Light Metals.* — 2000. — **50**, № 4. — P. 166–172.
13. *Heat* inputs and mechanical properties of friction stir welding / K. Aota, H. Okamura, E. Masakuni et al. // *Proc. of the 3rd Intern. friction stir welding symp., Kobe, Japan, 27–28 Sept., 2001.*
14. *Analysis* of friction stir welds using thermocouple measurements / S. G. Lambrakos, R. W. Fonda, J. O. Milewski et al. // *Sci. Technol. Weld. Joining.* — 2003. — **8**, № 5. — P. 385–390.
15. *Investigation* on residual stresses in friction stir welds / C. Dalle Donne, E. Lima, J. Wegener et al. // *Proc. of the 3rd Intern. friction stir welding symp., Kobe, Japan, 27–28 Sept., 2001.*
16. *Volpone M., Mueller S. M.* Friction stir welding (FSW): le ragione di un successo // *Rivista Italiana della Saldatura.* — 2005. — № 1. — S. 23–30.
17. *Chao Y. P., Wang Y., Miller K. W.* Effect of friction stir welding on dynamical properties of AA 2024-T3 and AA 7075-T7351 // *Welding.* — 2001. — № 8. — P. 196–200.
18. *Ericsson M., Sandstorm R.* Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG // *Intern. J. of Fatigue.* — 2003. — № 25. — P. 1379–1387.
19. *Mechanical* properties of friction stir welded 5083 aluminum alloy at cryogenic temperatures / M. Hayashi, K. Oyama, H. Eguchi et al. // *Proc. of the 3rd Intern. friction stir weld. symp., Kobe, Japan, 27–28 Sept., 2001.*
20. *Nagano Y., Jogan S., Hashimoto T.* Mechanical properties of aluminum die casting joined by FSW // *Ibid.*
21. *Kimapong K., Watanabe T.* Friction stir welding of aluminium alloy to steel // *Welding J.* — 2004. — № 10. — P. 277–282.
22. *Friction* stir welding demonstrated for combat vehicle construction / K. J. Colligan, P. J. Konkol, J. J. Fisher et al. // *Ibid.* — 2003. — № 3. — P. 34–40.
23. *Shibayanagi T., Maeda M.* Characteristics of microstructure and hardness in friction stir welded 7075 aluminum alloy joints // *Trans. JWRI.* — 2004. — **33**, № 1. — P. 17–23.
24. *Friction* stir welding flies high at NASA / J. Ding, R. Carter, K. Lawless et al. // *Ibid.* — 2006. — № 3. — P. 54–59.
25. *Dolby R. E., Johnson K. J., Thomas W. M.* The joining of aluminium extrusions // *La Metallurgia Italiana.* — 2004. — № 3. — S. 25–30.
26. *Pekkari B.* The future of welding and joining // *Svetsaren.* — 2004. — № 1. — P. 53–59.
27. *Thomas W., Staines D.* Better joints using two contra — rotating FSW tools // *TWI Connect.* — 2006. — May/June. — P. 7.
28. *Laser* — assisted friction stir welding / G. Kohn, Y. Greenberg, I. Makover et al. // *Welding J.* — 2002. — № 2. — P. 46–48.
29. *Controlling* robotic friction stir welding / G. E. Cook, H. B. Smartt, J. E. Mitchell et al. // *Ibid.* — 2003. — № 6. — P. 28–34.
30. *Kato K., Sakano R.* Development of spot friction welding and application for automobile body // *J. of Light Metal Welding & Construction.* — 2004. — **42**, № 11. — P. 8–13.
31. *Imuta M., Kamimuki K.* Development and application of friction stir welding for aerospace industry // *Proc. of the IIW Intern. conference on technical trends and future prospectives of welding technology for transportation, land, sea, air and space, Osaka, Japan, 15–16 July, 2004.* — P. 53–64.
32. *Kumagai M.* Application of FSW for aircraft // *Welding Technology.* — 2003. — **51**, № 5. — P. 74–78.

The main directions of investigations conducted at the E.O.Paton Electric Welding Institute over half a century in the field of arc welding of aluminium alloys are outlined. Examples of an effective application of technologies of arc welding of aluminium alloys in fabrication of various structures are given.

Поступила в редакцию 05.04.2007