

СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ (Обзор)

Н. Г. ТРЕТЯК, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены основные принципы реализации нового способа сварки трением с перемешиванием (СТП), позволяющего получать различные соединения листовых заготовок. Описаны конструкции инструмента для осуществления СТП, особенности формирования соединений различных алюминиевых сплавов, их свойства и структура, области применения СТП, оборудование для СТП различных конструкций, методы контроля качества и способы устранения специфических дефектов.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, сварка трением с перемешиванием, инструмент, области применения, свойства, структура, разупрочнение

В декабре 1991 г. Британским институтом сварки (TWI) был запатентован новый способ сварки трением, позволяющий выполнять стыковые и нахлесточные швы листовых заготовок [1–3]. Условно он был назван способом сварки трением с перемешиванием (СТП, английский эквивалент FSW) для того, чтобы выделить его среди множества других существующих способов сварки трением [3–5]. Предлагались и другие названия, в частности, в [3] рекомендовалось назвать его способом с повышением реакционной способности (активации) на поверхности раздела.

Процесс сварки (рис. 1) при этом способе происходит следующим образом. Специальный вращающийся инструмент, состоящий из утолщенной части – заплечика (shoulder) и выступающей части – штыря (pin), в месте стыка вводится в соприкосновение с поверхностью зафиксированных на массивной подкладке соединяемых заготовок таким образом, чтобы штырь внедрился в заготовки, а заплечик коснулся их поверхности. В результате трения штыря и заплечика о заготовку выделяется тепло, которое доводит металл вокруг инструмента до пластичного состояния. Затем инструменту сообщают поступательное движение со скоростью

сварки, и материал заготовок, перемещаясь из зоны нагрева в зону охлаждения, огибает штырь и образует соединение.

По характеру протекания процесса получения соединения этот способ имеет много общего с пресованием. Поскольку алюминиевые сплавы являются благоприятным в этом отношении материалом, то СТП главным образом реализована для алюминия и его сплавов. Основными преимуществами процесса СТП, по мнению разработчиков, являются следующие [6–10]:

- отсутствие в процессе сварки дыма, шума и ультрафиолетового излучения;
- возможность получения беспористых швов на любом алюминиевом сплаве, включая сплавы, чувствительные к пористости (сплавы с магнием, литием и др.);
- отсутствие присадочного металла и защитного газа;
- не требуется придания специального профиля кромкам и удаление оксидной пленки перед сваркой;
- возможность получения соединений во всех пространственных положениях;
- процесс сварки идеально подходит для автоматизации;
- не требуется высокой квалификации оператора;

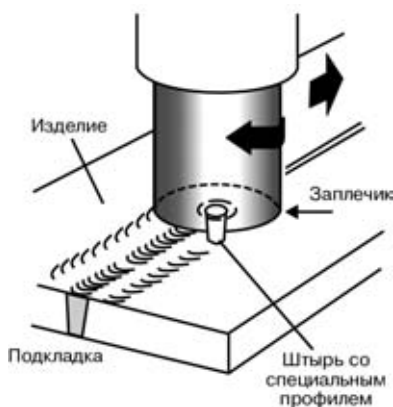


Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием

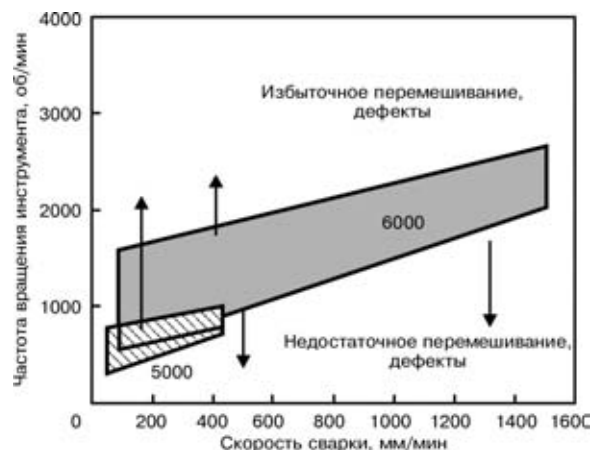


Рис. 2. Соотношение скорости сварки и частоты вращения инструмента, позволяющие получать качественные соединения алюминиевых сплавов серий 5000 и 6000 толщиной 5 мм

– благодаря относительной простоте оборудования достигается высокая эффективность использования энергии, так для выполнения однопроходной сварки алюминиевого сплава серии 6000 толщиной 12,5 мм требуется всего 3 кВт энергии в целом;

– сварка может выполняться в сильных магнитных полях, например, при соединении шинопроводов.

Низкий уровень деформаций, высокая воспроизводимость качества швов, полученных СТП, способствует улучшению существующих сварных конструкций из алюминиевых сплавов. При этом обеспечиваются следующие технологические возможности:

– швы могут быть получены на сплавах, которые нельзя выполнить сваркой плавлением из-за чувствительности к образованию горячих трещин;

– может быть достигнут более высокий уровень прочности для термически упрочняемых сплавов;

– формирование шва в твердой фазе позволяет сохранить свойства для метастабильных сплавов, таких, как композиты или сплавы, полученные быстрой кристаллизацией;

– можно получить крупные панели, состоящие из многочисленных небольших профилей, которые практически невозможно или экономически нецелесообразно прессовать или отливать;

– легкие прессованные панели могут быть соединены между собой без деформаций для получения более крупных конструкций судов, железнодорожных платформ или тяжелых грузовиков;

– для создания полых заготовок можно соединить более простые полуфабрикаты, полученные литьем или штамповкой;

– можно получать сварные узлы со стыковыми и нахлесточными швами из заготовок, изготавливаемых с помощью различных технологий (литье, прессование и др.);

– сборка стыков не требует очень точной подгонки кромок, так для листов толщиной 1,6 мм зазор может быть до 0,2 мм, для плит толщиной 12,7 мм – до 1,25 мм.

К недостаткам способа СТП можно отнести следующие [6]:

– необходимость мощных подкладок, на которых должны надежно закрепляться свариваемые заготовки;

– образование в конце шва отверстия, равного размеру штыря, которое необходимо заполнять с помощью других методов, таких, как вварка трением специальных пробок;

– применение вводных и выводных планок для получения протяженных швов на всю длину заготовок;

– ограничения в применении способа сварки в портативном варианте из-за закрепления заготовок на подкладке;

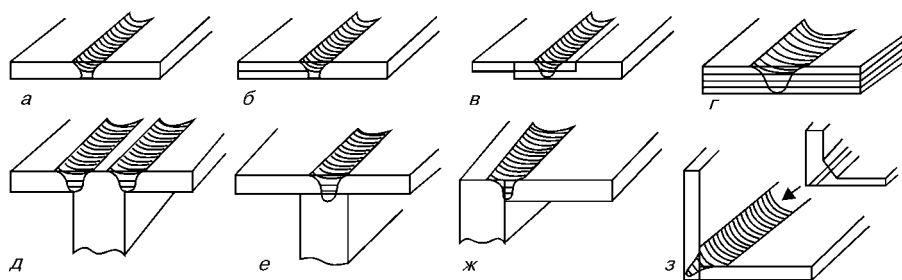


Рис. 3. Типы соединений, выполняемые СТП: а – стыковое; б – нахлесточно-стыковое; в – нахлесточное; г – многослойное нахлесточное; д – двухпроходное тавровое; е – тавровое прорезное; ж, з – угловое

– более низкий уровень скорости сварки по сравнению с механизированной дуговой сваркой для некоторых марок сплавов.

Основными параметрами процесса СТП являются [11]: скорость сварки (скорость перемещения инструмента), частота вращения инструмента, усилие прижатия и усилие перемещения инструмента, угол наклона инструмента, его размеры. Кроме того, учитываются условия трения в зависимости от применяемого материала инструмента и свариваемого материала, а также напряжение течения материала заготовок при температуре деформации.

Поскольку основные исследования СТП носят коммерческий характер и финансируются так называемыми Group Sponsored Project, то технологическая информация в публикациях ограничена и главным образом касается скоростей сварки и вращения инструмента [11, 12]. В работах [12, 13] приведены значения скорости сварки и частоты вращения рабочего инструмента (рис. 2), которые позволяют получить качественные соединения для сплавов серий 5000 и 6000. Как видно из рис. 2,

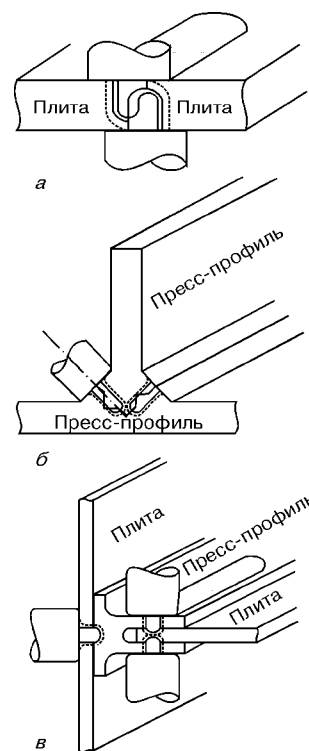


Рис. 4. Варианты соединений СТП различных полуфабрикатов: а – двухстороннее стыковое замковое; б – угловое замковое; в – прорезное

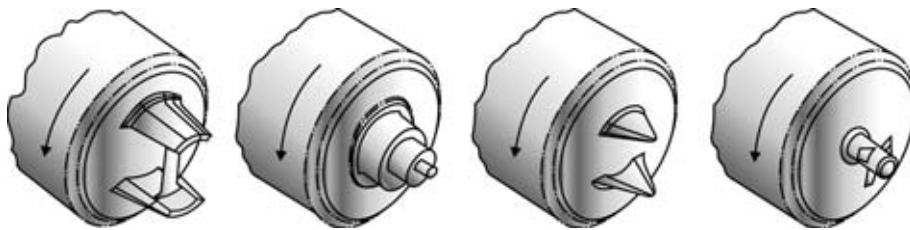


Рис. 5. Варианты конструктивного выполнения инструмента для СТП

сплавы серии 6000 можно сваривать в более широком диапазоне режимов, чем сплавы серии 5000.

Типы соединений, выполняемые СТП, характеризуются большим разнообразием: это и традиционные для дуговой сварки стыковые, угловые тавровые и нахлесточные (рис. 3), а также различного рода замковые и прорезные (рис. 4) швы [14, 15].

Особое внимание при создании СТП было уделено разработке конструкции вращающегося инструмента, от которого зависит формирование соединений, что подтверждается большим количеством патентов и публикаций. В [16] предложен инструмент, в котором по длине штыря выполнено несколько плоскостей, так, что он может иметь сечение в виде многоугольника, плоскость может быть свернута в спиральную полосу на поверхности штыря. Другие варианты предусматривают на штыре радиальные выступы аэродинамической формы, поперечные и продольные надрезы, выступы различной длины и формы на торце штыря и пр. Некоторые из этих вариантов инструмента приведены на рис. 5. Авторы [17] разработали составной инструмент, в котором штырь вставляется в тело заплечика и может легко заменяться другим (рис. 6). Для усиления течения пластифицированного металла заплечик выполнен в виде вогнутой поверхности, а штырь имеет резьбовую поверхность или, что более предпочтительно два или несколько выступающих ребер. Инструмент, одновременно выполняющий также роль подкладки соединяемых заготовок [18, 42], назван катушечным (Bobbin Tool) (рис. 7).

Расширяет технологические возможности рабочего инструмента конструкция с регулируемой в процессе сварки длиной штыря и диаметром заплечика (рис. 8) [19]. Это позволяет сваривать заготовки переменного сечения и избегать образования отверстия в конце шва при выполнении кольцевых швов. На этой основе реализован про-

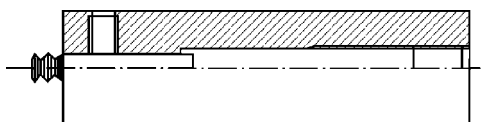


Рис. 6. Конструкция составного рабочего инструмента

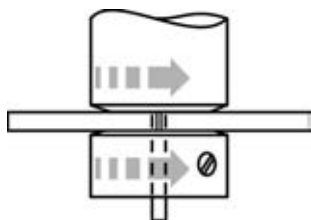


Рис. 7. Схема сварки инструментом в виде катушки (Bobbin Tool)

раммируемый процесс сварки, когда за счет изменения длины штыря от нуля до значения, равного толщине свариваемых заготовок, осуществляется плавный выход на достижение полного проплавления и окончание процесса без образования отверстия.

Для надежного прижатия заплечика к поверхности свариваемых заготовок и тем самым обеспечения постоянного теплового режима в зоне сварки разработана конструкция рабочего инструмента (рис. 9) с подвижным заплечиком, который постоянно находится в подпружиненном состоянии с заданным усилием [20].

При сварке некоторых высокопрочных алюминиевых сплавов для уменьшения прилипания металла к штырю и отвода избыточного тепла предложена конструкция инструмента с охлаждением его наружной стороны [21] путем пропускания хладагента (воды) или обдува воздухом (рис. 10). Существуют также конструктивные варианты, когда хладагент подается по каналам, расположенным внутри инструмента (рис. 10, б).

СТП заготовок сплава 6082 Т6 толщиной до 50 мм за один проход и толщиной до 75 мм с двух сторон стали возможны благодаря разработке инструментов семейства Whorl™ и MX Triflute™ [22, 23].

Профиль разработанного рабочего инструмента Whorl™ (рис. 11) напоминает по очертаниям длинную коническую морскую раковину. Несмотря на некоторые отличия, основная конструкция разработана так, что одновременно изменяется шаг, угол наклона профиля и тем самым оптимизируется процесс СТП различных алюминиевых сплавов и толщин (рис. 12). Инструмент с торговым знаком MX Triflute™ (рис. 13) позволяет сваривать заготовки толщиной от 6 до 50 мм за один проход [23]. Он имеет штырь в виде фигуры, ограниченной двумя параллельными плоскостями с тремя канавками и специальной нарезкой между ними. Такая форма штыря имеет большую по сравнению с цилиндрическим штырем поверхность и обеспечивает сварку при меньшем (примерно на 70 %) количестве перемещаемого металла. Для улучше-

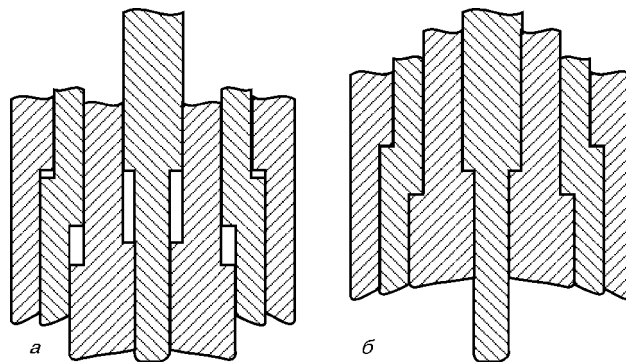


Рис. 8. Схема конструкции рабочего инструмента с регулируемой длиной штыря и минимальным (а), максимальным (б) диаметром заплечика

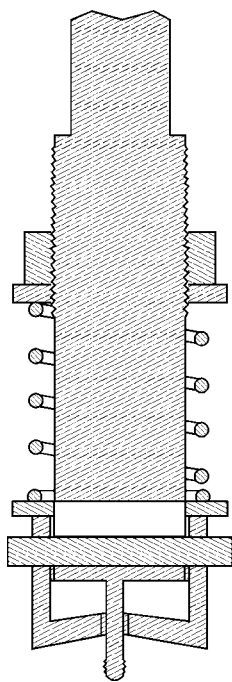


Рис. 9. Рабочий инструмент с подпружиненным заплечиком
ния переноса металла на заплечике выполнен ряд
концентрических канавок.

В последнее время в TWI разработана разновидность способа СТП, так называемая Skew-Stir™ технология [24], использующая специальный инструмент со штырем A-Skew™ (рис. 14), который закреплен в приводном валике под небольшим углом так, что точка пересечения осей валика и инструмента, получившая название фокусной точки, может располагаться над, под или в самой свариваемой заготовке в зависимости от свойств материала и параметров режима. Штырь A-Skew™, позволяет повысить соотношение динамического объема к статическому, т. е. увеличивает объем пластифицированного за данное время металла вокруг инструмента.

Нет сомнений, что в ближайшее время может появиться информация о новых модификациях инструментов.

Свойства соединений алюминиевых сплавов, полученных с помощью СТП, находятся на достаточно высоком уровне. В работах [11, 17, 25, 26] приведены результаты механических испыта-

ний сварных соединений прессованных заготовок сплавов серий 5000, 6000, 7000. Для различных толщин и условий сварки прочность для сплава AA 6082 T6 в состоянии после сварки составляет 70 % прочности основного металла. Искусственное старение после сварки восстанавливает прочность до 90 % исходной. При этом показатели пластичности находятся на уровне основного металла. Авторы [26] отмечают, что для сплава AA 6082 в состоянии до сварки T6 относительное удлинение соединений в состоянии после сварки и после искусственного старения почти в 2 раза ниже, чем основного металла. С этих позиций рекомендуется использовать режим термообработки основного металла T4.

Для сплава AA 7108 прочностные свойства соединений металла толщиной 2...7 мм после сварки и после естественного старения составляют соответственно примерно 86 и 94 % прочности основного металла. Согласно [27] коэффициент прочности сварных соединений для сплава 2014A T6 составляет 80, для 7075 T7351 — 70 %.

Прочностные характеристики соединений сплавов серии 5000 [25] в диапазоне толщин 6...15 мм и скоростей сварки 0,76...2,2 мм/с составляют от 303 до 344 МПа, что значительно выше, чем для сплавов 6000.

Авторы [28] исследовали механические свойства соединений сплава 7075 T651, полученных СТП. Установлено, что прочностные характеристики соединений ниже, чем основного металла, но превышают аналогичные характеристики, полученные другими способами. Последующее искусственное старение не позволяет восстановить прочность, и при этом снижаются показатели пластичности. Разрушение соединений происходит по ЗТВ в месте существенного огрубления структуры. В работе [28] также приведены свойства соединения в зоне ядра. При этом образцы вырезали в направлении вдоль шва. Отмечается, что пластические свойства после сварки находятся на уровне основного металла, а прочностные показатели ниже, чем основного металла, но выше, чем для соединений. Падение прочности в зоне ядра [28] связывают с уменьшением размера тонких упрочняющих частиц и количества дислокаций.

Анализ данных по усталостным испытаниям соединений алюминиевых сплавов, полученных СТП,

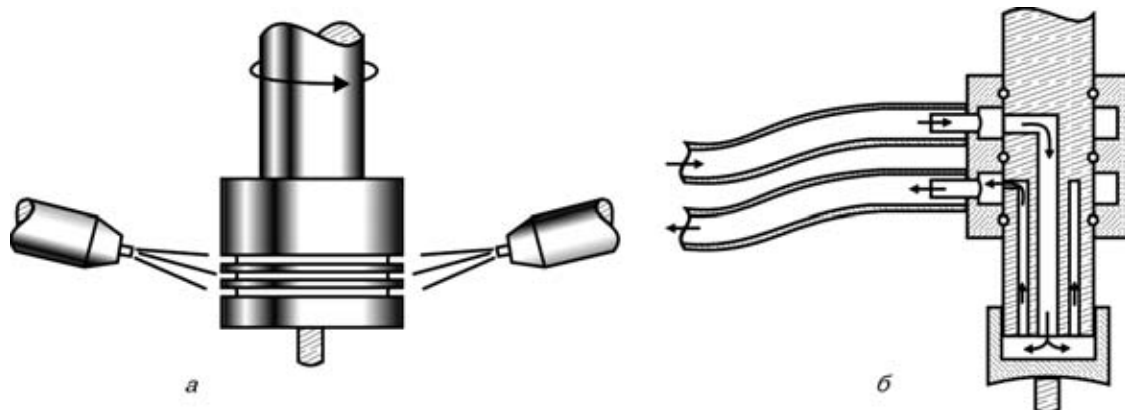


Рис. 10. Схема охлаждения рабочего инструмента с наружной (а) и с внутренней (б) подачи хладагента

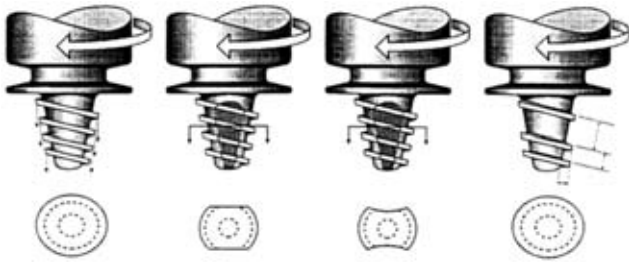


Рис. 11. Варианты конструкции рабочего инструмента с торговым знаком Whorl™

показал, что их работоспособность во многих случаях выше, чем соединений, полученных сваркой плавлением, и при этом меньше разброс значений [7, 15, 29, 30]. Результаты испытаний однопроходных сварных соединений листов толщиной 6 мм сплавов 5083-0 и 2014 T6 (рис. 15) были выше и с меньшим разбросом значений, чем для двухпроходных соединений, полученных ТИГ или МИГ способами сварки, которые регламентированы нормами BS 8118 класс 35 и Европейскими рекомендациями ВЗ для соединений, полученных сваркой плавлением [15]. Усталостные свойства СТП соединений сплавов 6082 T5 и 6005 T4 при коэффициенте асимметрии цикла R , равном -1 [17], близки к показателям основного металла, и значительно выше, чем для других способов сварки, в частности, МИГ и плазменной сварки со сквозным проникновением дуги.

Особенности микроструктуры в соединениях, как известно, зависят от термического цикла сварки. Для этого были проведены замеры температурных полей при СТП с помощью термопар [26]. Как видно из рис. 16, СТП характеризуется достаточно высокими градиентами температур, и максимум температур нагрева около $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ существует очень короткое время. Температурный интервал $200\text{...}300\text{ }^{\circ}\text{C}$, определяющий размеры ЗТВ, также не превышает нескольких секунд. Это подтверждает тот факт, что уровень свойств соединений за счет уменьшения степени разупрочнения при СТП выше.

Близкие значения максимальных температур на уровне $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ зафиксированы и другими исследователями [28, 31] при сварке сплава 7075 T651 и сплава 6N01 системы Al-Si-Mg.



Рис. 12. Макроструктура двухстороннего соединения плит сплава 6082 T6 толщиной 75 мм



Рис. 13. Прототип инструмента с торговым знаком MX Triflute™

В работах [32, 33] приведены результаты математического моделирования тепловых процессов при СТП с использованием традиционных подходов для описания температурных полей движущихся источников нагрева, а также на основе метода конечных разностей. Полученные уравнения с определенной точностью позволили вычислить максимальную температуру под инструментом и термические циклы в металле ЗТВ, которые удовлетворительно согласуются с экспериментами.

Сравнение распределения твердости в соединениях сплава 6N01, выполненных МИГ и СТП способами, показало, что степень разупрочнения в металле ЗТВ для СТП соединений резко уменьшается [31].

Изменение твердости в стыковых соединениях сплавов 5083-0, 2014A T6, 7075 T7351 (рис. 17) характеризуется повышением показателя в зоне ядра и наличием участков отжига в металле ЗТВ для термически упрочняемых сплавов. Зона разупрочнения составляет примерно 30 мм на сторону от центра шва.

Макроструктура швов, полученных СТП, характеризуется особенностями, не свойственными швам, которые получены способами сварки плавлением, в частности, ТИГ и МИГ. Основным отличием является образование в центре соединения ядра [34], которое независимо от сплава содержит так называемые годичные кольца (рис. 18), т. е. концентричные овальные кольца, различающиеся макроструктурой. Как видно из рис. 18, форма ядра шва несколько отличается в зависимости от

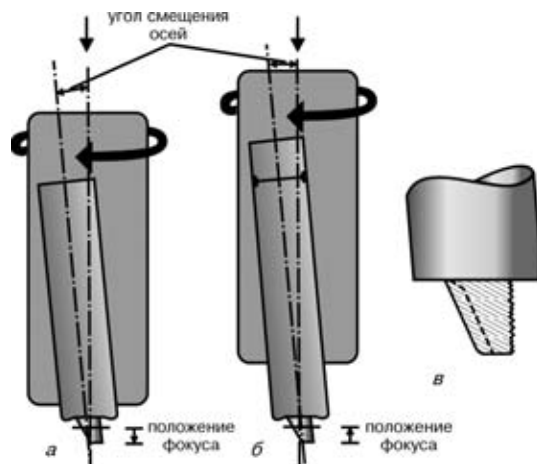


Рис. 14. Принцип осуществления разновидности процесса СТП Skew-Stir™ (а, б) и штырь инструмента A-Skew™ (в)

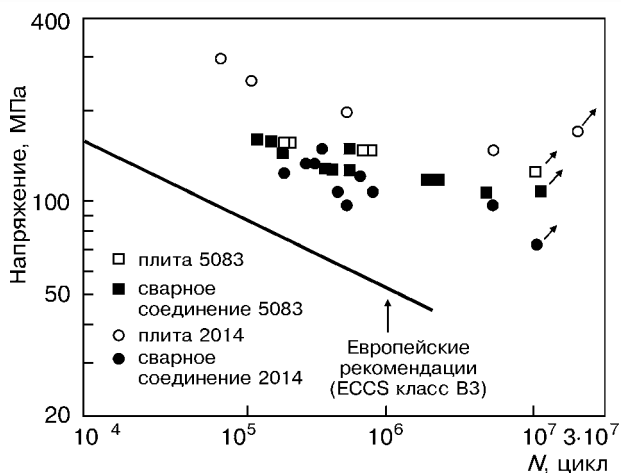


Рис. 15. Усталостные свойства стыковых СТП соединений сплавов 5083-0 и 2014 Т6

сплава. К ядру примыкает сложный профиль, который образует верхнюю часть шва и по ширине несколько превышает диаметр бурта инструмента. Диаметр ядра незначительно больше, чем диаметр штыря инструмента и располагается, как правило, в нижней части соединения. Существенные изменения макроструктуры наблюдаются непосредственно возле ядра, которые вызваны значительной пластической деформацией металла и разворотом зерен до 90°, что в итоге сказывается на снижении твердости и механических свойствах [34].

На основании исследования микроструктуры большого массива соединений различных алюминиевых сплавов автор работы [34] выделяет в соединении четыре зоны, которые схематически представлены на рис. 19. Непосредственно к зоне А (основному металлу) примыкает зона В, где металл заготовок остается недеформированным и изменяет свою структуру только под воздействием нагрева. Эта зона по аналогии с дуговыми способами названа зоной термического влияния (ЗТВ). Зона С, где металл подвергается значительным пластическим деформациям и нагреву, названа зоной термомеханического влияния. И, наконец, зона D — это ядро соединения, где происходит динамическая рекристаллизация. Исследования, выполненные в [25, 34] на сплавах серий 2000, 5000, 7000, показали,

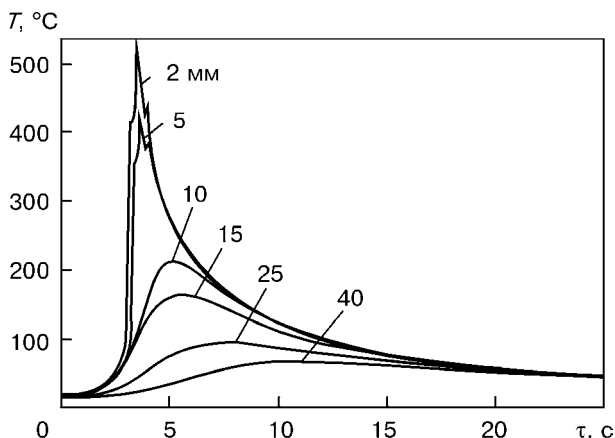


Рис. 16. Термический цикл при СТП со скоростью 0,5 м/мин сплава АА 6063 толщиной 4 мм при разном расстоянии от центра шва

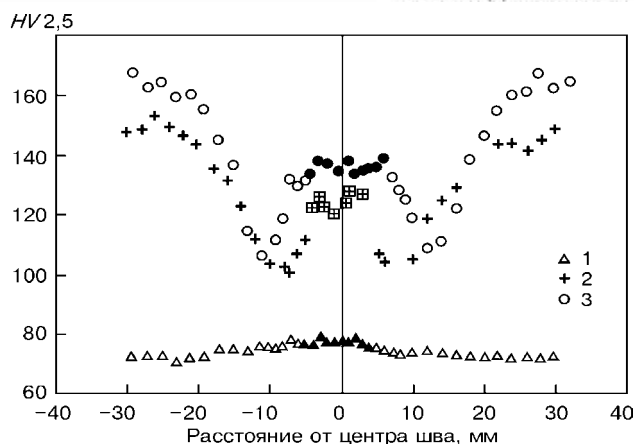


Рис. 17. Распределение твердости в поперечном сечении СТП соединений сплавов 5083-0 (1), 2014А Т6 (2) и 7075 Т7351 (3) толщиной 6,4 мм

что в ЗТВ металл отличается от основного металла повышенной травимостью, снижением твердости за счет перестаривания, уменьшения плотности дислокаций либо за счет обоих этих механизмов. В зоне термомеханического влияния происходит изгиб вытянутых зерен основного металла и их частичная рекристаллизация. Под действием термического цикла в этой зоне происходят процессы старения и отжига и в результате наблюдается минимальный уровень твердости. Следует отметить, что некоторые участки зоны С могут нагреваться до сравнительно высоких температур, при которых возможно растворение упрочняющих фаз.

Микроструктура ядра состоит из равноосных зерен, размер которых зависит от технологии и марки сплава, но обычно не превышает 10 мкм. Твердость этой зоны заметно ниже, чем основного металла в термически упрочненном или нагартованном состоянии, хотя для сплава 5083 в отожженном состоянии твердость ядра несколько выше, чем основного металла [25, 34].

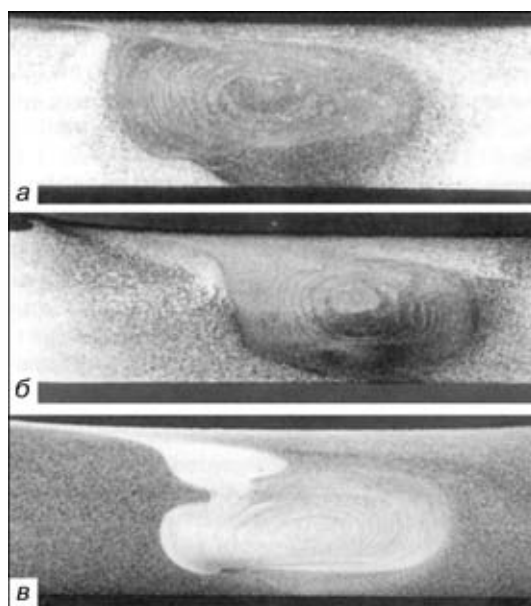


Рис. 18. Макроструктура СТП соединений листов толщиной 6,4 мм: а — сплав 7075 Т7351; б — сплав 2014 Т6; в — сплав 5083 Н321, $\times 3,75$



Рис. 19. Схема зон стыкового соединения, выполненного СТП: А — основной металл; В — зона термического влияния; С — зона термомеханического влияния; D — зона динамической рекристаллизации

Авторы работы [25] исследовали микроструктуру и микротвердость ядра в местах наличия так называемых годичных колец и близлежащих участков для сплавов AA 5083 и AA 6082, однако каких-либо отличий им выявить не удалось.

В работах [28, 34, 35] приведены результаты электронно-микроскопических исследований на сплавах 7075 T6 и 2014 T6, характеризующие механизмы фазовых выделений и их размеры, кристаллографию зерен и дислокационную структуру ядра. Авторы отмечают необходимость дальнейших

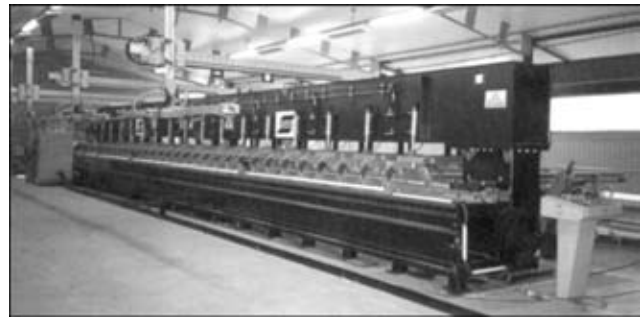


Рис. 20. Установка ESAB Super Stir™ для сварки прессованных панелей, поставленная на фирму «Marine Aluminium» (Норвегия)

исследований для объяснения феномена образования структуры ядра в центре сварного соединения.

Оборудование для СТП состоит из приводов вращения инструмента и его вертикального перемещения, привода перемещения в направлении сварки, а также устройства для закрепления в собранном состоянии свариваемых деталей. Как правило, установки для СТП имеют специализированный характер и создаются применительно к определенным размерам и форме конструкции. В таблице приведены параметры установок для СТП [36], разработанные в TWI.

При участии TWI в отделе инженерной механики университета в г. Аделаида (Австралия) была разработана и успешно использована портативная установка для СТП заготовок деталей морских судов из сплава AA 5083 толщиной до 5 мм [37]. Установка может переноситься и устанавливаться без использования крана двумя операторами и позволяет сваривать стыковые швы при наличии кривизны соединяемых заготовок. Высокое качество сварных соединений и отсутствие усиления шва позволило использовать технологию взрывной формовки для получения готовых секций днища скоростных судов.

Основным разработчиком и производителем промышленных установок, имеющих торговый знак Super Stir™, является шведская фирма ESAB. Первая установка была поставлена на фирму «Marine Aluminium» (Норвегия) [11, 38] для укрупнения прессованных панелей судов и железнодорожных вагонов (рис. 20). Она позволяет сваривать заготовки толщиной от 1,6 до 15 мм при максимальных их размерах 16×6 м. Опыт эксплуатации этой установки показал, что в среднем срок службы рабочего инструмента равен 1...2 км и к апрелю 2000 г. было произведено около 200 км швов без дефектов.

В [39] сообщается о продаже фирмой ESAB двух установок для шведского отделения фирмы SAPA, являющейся крупнейшей в Европе по изготовлению алюминиевых профилей. Первая установка имеет две сварочные головки и используется для изготовления деталей подвижного состава железнодорожного и автомобильного транспорта. Вторая — пред-

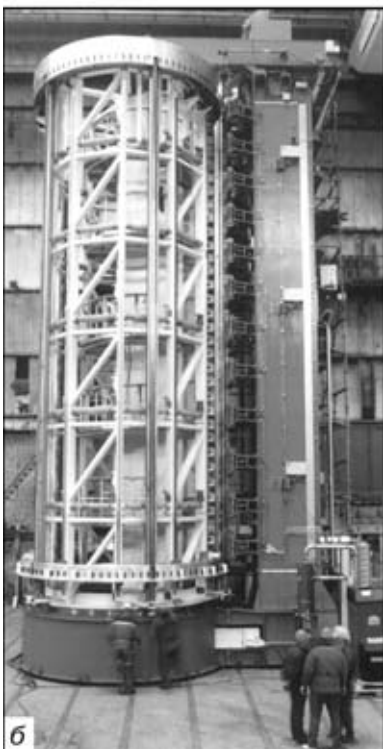


Рис. 21. Установка ESAB Super Stir™ на фирме «Boeing» для сварки обечаек ракет «Delta» в нижнем (а) и вертикальном (б) положении



Рис. 22. Фрагмент топливного бака ракеты «Delta» с продольным СТП швом

назначена для изготовления профилей большого сечения длиной до 14,5 м и содержит три сварочные головки, позволяющие одновременно сваривать две стороны профиля или проводить сварку стыка с двух сторон.

ESAB также успешно выполняет программу по разработке и поставке установок для фирмы «Boeing» (г. Хантингтон Бич, США) [27]. На первом этапе поставлены установки для сварки продольных швов топливных баков ракет «Delta» II и III, которые позволяют выполнить швы длиной до 15,3 м при диаметре баков от 2 до 6 м (рис. 21, а). Еще две аналогичные машины закуплены фирмой «Boeing» для завода в г. Декатур, однако с целью экономии производственных площадей процесс сварки будет выполняться в вертикальном положении (рис. 21, б) [40]. Закупка этого оборудования и проведение собственных исследований обошлась фирме «Boeing» 15 млн дол. США. «Boeing» закупила у ESAB также установки для сварки кольцевых швов и укомплектовала поточную линию по производству с помощью СТП топливных баков ракет семейства «Delta». Все емкости диаметром 2,4 м состоят из трех панелей из сплава 2014 Т6 с вафельным фоном толщиной 22,22 мм и свариваются тремя продольными швами (рис. 22).

Первый прототип мощной промышленной установки в Великобритании разработан и изготовлен фирмой «Crawford Swift» по заказу «British Aerospace» [41]. Установка с торговым знаком «Power



Рис. 23. Установка «Power Stir-360» фирмы «Crawford Swift» (Великобритания) мощностью 60 кВт

Stir™» (рис. 23) на заводе в г. Филтоне в ближайшие два года будет использована для выполнения программы, связанной с использованием СТП применительно к соединению элементов крыльев для нового поколения самолетов Airbus А3ХХ пассажироместимостью до 550 чел.

Основные области применения СТП — это судостроение (палубные надстройки, переборки, элементы корпуса); аэрокосмическая промышленность (элементы фюзеляжа, крыльев, топливные и баки криогенных жидкостей, корпуса ракет); железнодорожный транспорт и метро (корпуса вагонов, рамы и основания поездов метро); автомобильная промышленность (узлы крепления двигателя, диски колес, рамы автомобилей); электротехническая промышленность (корпуса электромоторов, токоподводы, параболические антенны, шины); строительная индустрия (алюминиевые мосты, алюминиевые трубопроводы, теплообменники и кондиционеры); пищевая промышленность (емкости для пива, упаковка) и пр. [12, 13, 31, 36, 42]. Этот перечень можно продолжать бесконечно. Особенно эффективно применение СТП при производстве массовых деталей [43]. На рис. 24, а показан автомобильный диск, состоящий из литой ступицы и обода, изготовленного вытяжкой или прокаткой, а на рис. 24, б — корпус электродвигателя, полученный из пресованных заготовок.

Примером успешного применения СТП явилась также сварка железнодорожных вагонов из алюминиевых пресованных панелей [12] фирмой «Hitachi», которых уже произведено более 200 шт. (рис. 25).

По мнению большинства исследователей, основным специфическим дефектом соединений, выполненных СТП, является несплавление в корне шва, которое называют «kissing bonds». Основными причинами возникновения этого дефекта яв-

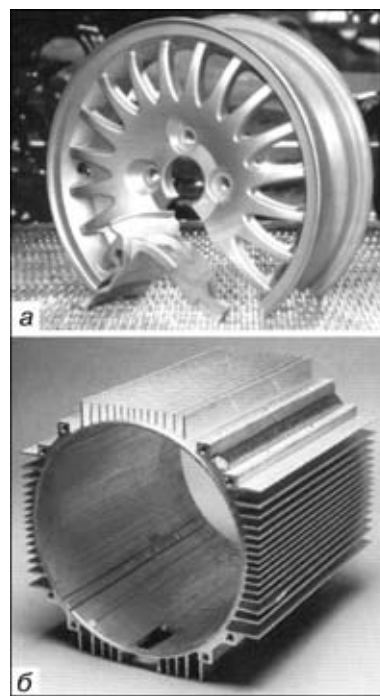


Рис. 24. Автомобильный диск (а) и корпус электродвигателя (б), полученный СТП

Установки для СТП, разработанные в TWI

Тип машины	Свариваемые толщины, мм	Скорость сварки, м/мин	Размеры свариваемых заготовок, м	Примечание
FW 20	1,2...12	2,6	—	Максимальная частота вращения инструмента 15000 об/мин
FW 21	3...15	1,0	2×1,2	
FW 22	3...15	1,2	3,4×4	
FW 14	5...50 100 (с двух сторон)	1,0	—	Мощность машины 22 кВт
FW 16	Маленькая транспортируемая машина для демонстрации процесса СТП			

ляется либо локальное увеличение толщины свариваемого металла, либо нарушение переноса металла в корневую часть соединения. Как правило, этот дефект имеет очень малый размер по толщине, поэтому выявить его с помощью рентгеновского контроля весьма затруднительно. Более дешевым и надежным является ультразвуковой метод [11, 12]. В некоторых промышленных установках фирмы ESAB оборудование для ультразвукового контроля вмонтировано в установку и контроль производится одновременно с процессом сварки [27].

Наиболее простым методом контроля является визуальный осмотр, производимый оператором-сварщиком [11]. Если представляется возможным, из начальной и конечной части свариваемых заготовок, например, прессованных панелей, вырезают образцы-свидетели, из которых изготавливают шлифы и изучают макроструктуру соединений. В некоторых случаях подозрительные участки корневой части соединений контролируют с помощью цветной дефектоскопии.

Уровень дефектности швов, полученных дуговой сваркой плавящимся электродом, почти на порядок меньше, чем у СТП [27, 40]. Это позволяет сэкономить несколько сотен тысяч долларов в год на ремонте дефектных участков. Кроме того, столь высокое качество швов СТП позволяет не проводить 100 % контроль швов, а применять выборочный статистический процесс контроля [27] и также экономить деньги.

Специалисты TWI предложили наносить на корневую сторону соединения так называемый знак идентификации [22] путем гравирования в подкладке зеркального отображения необходимой информации о фирме-изготовителе, времени, дате сварки и т. д. Во время сварки металл шва заполняет углубления в подкладке и формирует соответствующее слово или знак. Степень заполнения гравировки в подкладке может также служить своеобразным показателем качества соединения, особенно его корневой части, где наиболее часто образуются дефекты. Улучшение перемешивания металла в корневой части соединения можно достичь путем выполнения скоса кромок с обратной стороны пластин (рис. 26, а), которое улучшает заполнение этой области при его течении в пластифицированном состоянии [44].



Рис. 25. Железнодорожный вагон, изготовленный фирмой «Hitachi» с использованием СТП

Устранению дефектов в корне шва способствует применение подкладок с канавкой (рис. 26, б), в которую выдавливается металл, формируя небольшой валик [45]. Затем он удаляется механической обработкой, обеспечивая высокое качество корневой части соединения.

Одним из небольших недостатков соединений, выполненных СТП, является образование незначительного уменьшения толщины металла в области соединения за счет контакта заплечика инструмента и поверхности заготовок. Обычно эта величина составляет 0,1...0,2 мм, однако, в некоторых случаях это может оказать влияние на прочность соединений. Для устранения этого недостатка рекомендуется создавать в месте стыка утолщение (рис. 26, в), равное по ширине диаметру заплечика. Особенно эффективен этот способ, по мнению его авторов, при наличии зазора в стыке [13].

Таким образом, материалы зарубежных публикаций свидетельствуют об интенсивном развитии процесса СТП различных алюминиевых сплавов и расширении областей его применения в промышленном производстве при изготовлении широкой гаммы сварных конструкций. Такие преимущества СТП по сравнению с другими способами сварки плавлением, как возможность соединения трудно-свариваемых сплавов, обеспечения минимальных сварочных деформаций и напряжений, отсутствие вредных выделений и излучений, высокий уровень свойств соединений и производительность процес-

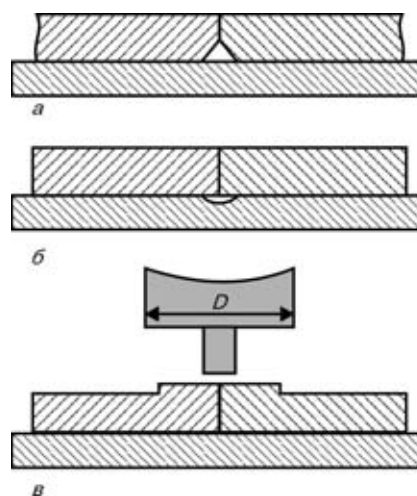


Рис. 26. Подготовка свариваемых кромок со скосом в корневой части (а); выполнение канавки в подкладке (б) и создание местного утолщения в зоне сварки (в)

са, обеспечат широкое распространение его при изготовлении ответственных конструкций для авиационного, судостроения, транспортного машиностроения и ракетно-космической техники.

1. *Eur. Pat. Spec. 0615480B1*. Improvements relating to friction welding / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham; Опубликовано. 1995.
2. *Eur. Pat. 95907888.2*. Friction stir welding / O. T. Midling, E. J. Morley, A. Sandvik (Norsk Hydro, rights transferred to TWI); Опубликовано. 1995.
3. *Shinoda T., Endo S.* Recent development of friction welding of aluminium alloys and dissimilar materials // *J. of Light Metal Welding Constr.* — 1995. — № 7. — P. 19–26.
4. *Irving B.* Sparks begin to fly in nonconventional friction welding and surfacing // *Welding J.* — 1993. — 72, № 5. — P. 37–40.
5. *Gas additions boost friction performances* // *TWI Connect.* — 1997. — № 9. — P. 3.
6. *Dawes C. J.* An introduction to friction stir welding and its development // *Welding and Metal Fabric.* — 1995. — № 1. — P. 13–16.
7. *Dawes C. J., Thomas W. M.* Friction stir process welds aluminium alloys // *Welding J.* — 1996. — № 3. — P. 41–45.
8. *Dawes C., Thomas W.* Trecie zvaranie hlinikových zliatin premiesanim rotujucim nastrojom // *Zvaranie Svarovani.* — 1998. — № 7. — P. 163–167.
9. *Pat. 9125978.8. GB 2306366 A*. Friction stir bult welding / W. M. Thomas et al.; Опубликовано. 05.07.97.
10. *Midling O. T.* Material flow behaviour and microstructural integrity of friction stir butt weldments // *Proc. of 4th Intern. conf. on aluminium alloys (ICAA4)*. Atlanta, 1994.
11. *Midling O. T., Hval M., Johansen H. G., Oosterkamp L. D.* Process optimisation of friction stir welding in fabrication of aluminium ship panels // *Proc. Third intern. forum on aluminium ships.* — Haugesund, 27–28 May, 1998. — P. 2–10.
12. *Okamura H., Aota K., Erumi 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. *Okamura H.* Character of friction stir welding and application in Japan // *J. of Jap. Weld. Soc.* — 2000. — 69, № 7. — P. 11–17.
14. *Dawes C. J., Andrews R. E.* Friction stir welding of aluminium alloy 6–35 mm thick // *Forum Materialteknik Conf., Vasteras, Sweden, 18–19 Nov., 1998.*
15. *Dawes C. J., Thomas W. M.* Friction stir joining of aluminium alloys // *Bulletin TWI.* — 1995. — № 6 (November/December). — P. 124–127.
16. *Pat. GB 2306366A, UK, B 23 K 20/12*. Friction stir welding / T. W. Morris, E. D. Nicholas, J. C. Needham et al.; Опубликовано. 1997.
17. *Midling O. T., Oosterkamp L. D., Bersaas J.* Friction stir welding aluminium — process and applications // *Proc. 7th Intern. conf. «Joints in aluminium», Cambridge, 16 April, 1998.* — P. 161–169.
18. *Pat. 5460317 GB, B 23 K 20/12*. Friction welding / C. Dawes, Ed. D. Nicholas, M. G. Murch et al.; Опубликовано. 1995.
19. *Pat. 5697544 US, B 23 K 20/12*. Adjustable pin for friction stir welding tool / D. H. Wykes; Опубликовано. 1997.
20. *Pat. 5718366 US, B 23 K 20/12*. Friction stir welding tool for welding variable thickness work pieces / K. J. Colligan; Опубликовано. 1998.
21. *Pat. 5718366 EP 0810056 US, B 23 K 26/12*. Friction stir welding with simultaneous cooling / K. Colligan; Опубликовано. 1997.
22. *Thomas W. M.* Friction stir welding and related friction process characteristics // *Proc. 7th Intern. conf. «Joints in Aluminium».* — Cambridge, 16th April, 1998. — P. 529–529.
23. *Thomas W. M., Threadgill P., Nicholas D. et al.* Tool technology. The heart of FSW // *Connect.* — 2000. — July/August. — P. 3.
24. *Thomas W., Dolby R., Johnson K.* Variation on a theme skew-Stir™ technology // *Welding and Metal Fabric.* — 2001. — 69, № 7. — P. 20–22.
25. *Karlson J., Karlsson B., Larsson H. et al.* Microstructure and properties of friction stir welded aluminium alloys // *Proc. 7 Intern. conf. «Joints in Aluminium», Cambridge, 16 April, 1998.* — P. 221–230.
26. *Backlund J., Norlin A., Anderson A.* Friction stir welding — weld properties and manufacturing technique // *Ibid.* — P. 171–181.
27. *Johnsen M. R.* Friction stir welding takes off at boeing // *Welding J.* — 1999. — № 2. — P. 35–39.
28. *Mahoney M. W., Rhodes C. G., Flintoff J. G. et al.* Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminium // *Metallur. and Materials Trans.* — 1964. — 29 A, № 6. — P. 1955.
29. *Hynds P.* Friction stir benefits include cost savings // *Speed at Sea.* — 1999. — № 10. — P. 33–36.
30. *Larsson H., Svensson L.-E., Karlsson L.* Construcción naval avanzada con aluminio // *Rev. Soldadura.* — 1997. — 27. — P. 180–188.
31. *Kumagai M., Tanaka S.* Application of friction stir welding to welded construction of aluminium alloys // *J. of Light Metal Welding Constr.* — 2001. — 39, № 1. — P. 22–28.
32. *Frigaard O., Grond O., Miglin O. T.* Modelling of heat flow phenomena in friction stir welding of aluminium alloys // *Proc. 7 Intern. conf. «Joints in aluminium», Cambridge, 16 April, 1998.* — P. 197–207.
33. *Russel M. J., Shercliff H. R.* Analytical modelling of friction stir welding // *Ibid.* — P. 185–195.
34. *Threadgill P.* Friction stir welds in aluminium alloys — preliminary microstructural assessment // *TWI Bulletin.* — 1997. — March/April. — P. 30–33.
35. *Rhodes C. G., Mahoney M. W., Bingel W. H. et al.* Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminium // *Scripta Materialia.* — 1997. — 36. — P. 69–75.
36. *Kallee S., Nicholas D.* Causing a stir in the future // *Welding and Joining.* — 1998. — № 2. — P. 18–21.
37. *Henderson I.* Exploiting friction stir welding in explosively formed aluminium boat hull construction // *Proc. 7th Intern. conf. INALCO-98.* — Cambridge, 1998. — P. 151–157.
38. *Weman K.* Equipment for aluminium welding // *Svetsaren.* — 2000. — № 2. — P. 11–13.
39. *Friction-Stir-Welding nun auch in der Massenproduktion von Aluminiumprofilen* // *Sweissen Pruftechnik.* — 1999. — № 9. — P. 135.
40. *Pekkari B.* Trends in joining and cutting within a sustainable world // *Bulletin TWI.* — 2000. — № 19. — March/April.
41. *Heavy-duty machine for friction welding* // *Metals Ind. News.* — 2000. — 17, 1. — P. 10.
42. *Fukuda T.* Friction stir welding [FSW] process // *J. of Jap. Weld. Soc.* — 2000. — 69, № 7. — P. 6–10.
43. *Pat. W 09715462, NO, B 23 K 20/2*. Two-piece wheel / A. E. Johan, M. E. James, M. O. Terge et al.; Опубликовано. 05.01.97.
44. *Pat. US 5611479, US, B 23 K 20/12*. Friction stir welding total penetration technique / Ch. Posen; Опубликовано. 1997.
45. *Pat. EP 0810054, US B 23 K 20/12*. Weld root closure method for stir welds / K. Colligan; Опубликовано. 03.12.97.

Considered are main principles of realisation of a new method for friction stir welding (FSW), allowing production of various joints in sheet billets. Designs of the tools for realisation of FSW, peculiarities of formation of the joints in different aluminium alloys, their properties and structure, application fields for FSW, equipment for FSW of various structures, quality control methods and methods for elimination of specific defects are described.

Поступила в редакцию 13.05.2002