



У ДК 621.791

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ ДВУХСТОРОННЕЙ СВАРКЕ ТИГ

Х. ГАО, Л. ВУ, Х. ДОНГ (Харбинский технологический ин-т, Китай)

С помощью теоретического анализа, экспериментирования и численного моделирования исследован механизм проплавления при двухсторонней сварке ТИГ. Результаты показали, что при прохождении сварочного тока непосредственно через зону сварки происходит его концентрированное распределение, формируется более сильное электромагнитное поле и вызывается более сильное течение жидкости в сварочной ванне, что способствует проплавлению. В процессе двухсторонней сварки ТИГ при частичном проплавлении шва между нижними частями двух сварочных ванн образуется зона накопления тепла, где температура быстро повышается даже при небольшом количестве подводимого тепла. В нижней сварочной ванне выталкивающая сила создает поток, направленный внутрь, который может перемещать горячую жидкость с поверхности сварочной ванны в ее нижнюю часть, формируя таким образом глубокую сварочную ванну.

Ключевые слова: двухсторонняя сварка ТИГ, проплавление шва, численное моделирование, алюминиевый сплав

Проблемы повышения производительности и экономия затрат всегда актуальны для сварочного производства. Важным средством решения этих проблем должно стать внедрение высокоэффективных сварочных процессов, таких как дуговая сварка под флюсом или сварка МИГ, за счет сокращения объема использования дуговой сварки металлическим покрытым электродом. Повышение уровня автоматизации и расширение технологических возможностей можно достичь путем внедрения роботизированных сварочных установок. При этом на базе основных сварочных процессов следует разрабатывать новые высокоэффективные способы сварки [1]. При изготовлении металлических конструкций средней толщины благодаря проплавляющей способности сварочной дуги кромки шва подготавливают с одной или двух сторон и затем заполняют присадочным материалом. При этом возникает ряд проблем, среди них уменьшение производительности, увеличение затрат и расхода присадочного металла. Многослойные швы склонны к образованию дефектов — включений, несплавлений, большой зоны термического влияния (ЗТВ) и пр. С увеличением толщины конструкции эти проблемы усугубляются. Таким образом, повышение проплавляющей способности можно считать одной из главных задач исследований.

Для решения указанных проблем выполнен большой объем исследовательских работ. На основании их результатов разработан способ двухсторонней дуговой сварки. Понятие «двухсторонняя дуговая сварка» подразумевает, что с обратной стороны свариваемого изделия размещается еще одна сварочная горелка. В зависимости от количества источников питания и схемы соединения этот процесс можно классифицировать как работающий в режиме с двумя или с одним источником питания. Двухсторонняя дуговая сварка с двумя источниками питания имеет широкую сферу применения. Например, на Харбинском котлостро-

тельном заводе и Восточном котлостроительном предприятии Китая двухсторонняя импульсная сварка МИГ использовалась для изготовления трубных досок, при этом наблюдали низкий уровень сварочной деформации и значительную производительность процесса [2].

В 1998 г. И. М. Цанг из университета штата Кентукки (США) предложил способ двухсторонней дуговой сварки с одним источником питания [3–6]. Основная идея заключалась в усилении проплавляющей способности дуги и повышении производительности сварки без увеличения расходов. При указанном способе сварки предполагается размещение второй горелки с обратной стороны свариваемого изделия. Обе горелки подсоединены непосредственно к сварочному источнику питания, таким образом исключается контакт со свариваемым изделием. Сварочный ток идет от одной дуги через свариваемое изделие ко второй, создавая в зоне сварки высокий уровень тепловыделения. При том же значении сварочного тока повышается глубина проплавления, уменьшается ЗТВ и улучшается качество формирования шва. При таком способе сварки можно комбинировать различные виды традиционных дуговых технологий и использовать стандартный источник питания.

Особенностью двухсторонней дуговой сварки является не только дополнительное использование второго источника нагрева, но и наличие элект-

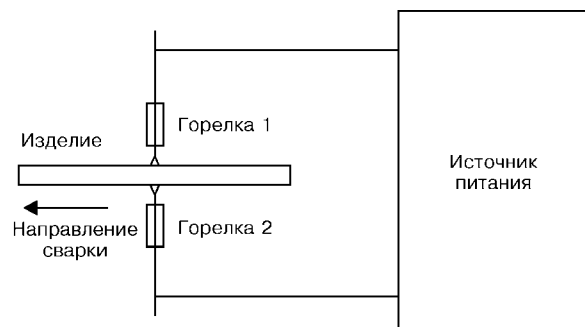


Рис. 1. Схема двухсторонней дуговой сварки

© Х. Гао, Л. Ву, Х. Донг, 2003

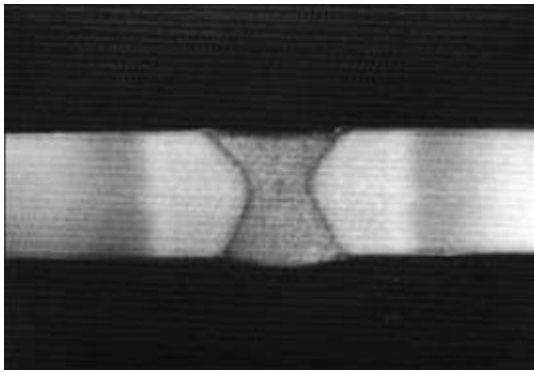


Рис. 2. Макрошлиф поперечного сечения соединения, выполненного двухсторонней сваркой ТИГ на пластине из сплава LY12 толщиной 6 мм на следующем режиме: $I_{св} = 100$ А; $v_{св} = 5$ мм/с

ромагнитного взаимодействия между источниками. Это отличает указанный способ сварки от обычного. Поскольку это взаимодействие было недостаточно изучено, возникла необходимость в исследовании механизма проплавления и разработке руководства по применению указанного способа.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований возможности использования двухсторонней сварки ТИГ применительно к сплаву алюминия. Обсуждается механизм проплавления при двухсторонней сварке ТИГ.

Проведение экспериментов. На рис. 1 показана схема двухсторонней дуговой сварки. В этой схеме горелки 1 и 2 являются обычными сварочными горелками, используемыми при сварке ТИГ. Сварочный источник питания СОМРА500Р (производство Японии) имеет на выходе переменный ток прямоугольной формы и оснащен высокочастотным осциллятором.

В экспериментах использовали алюминиевые сплавы LY12 и LF6, два вольфрамовых электрода диаметром 3 мм, в качестве защитного газа — аргон. Наплавку валиков на пластину из алюминиевого сплава выполняли без присадочного материала. Во время процесса сварки контролировали стабильность процесса, профиль дуги и сварочную ванну. На рис. 2 и 3 представлены макрошлифы поперечных сечений швов.

По результатам экспериментов можно сделать выводы, что двухсторонняя сварка ТИГ характеризуется следующими особенностями:

значительной проплавляющей способностью.

Из рис. 4 видно, что проплавление шва частичное,

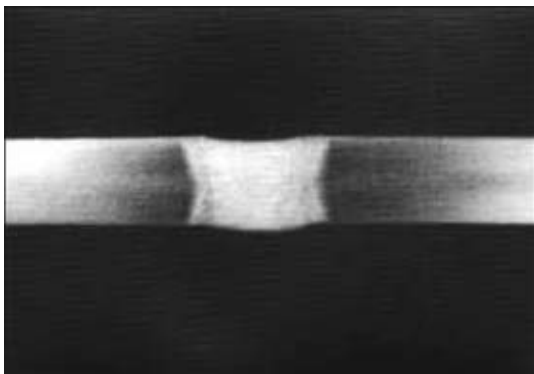


Рис. 3. Макрошлиф поперечного сечения шва, выполненного двухсторонней сваркой ТИГ на пластине из сплава LF6 толщиной 4 мм на следующем режиме: $I_{св} = 65$ А; $v_{св} = 5$ мм/с

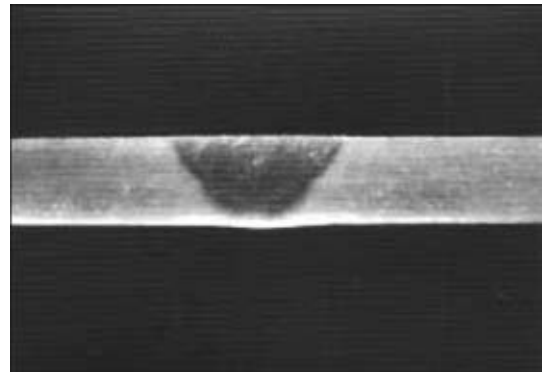


Рис. 4. Макрошлиф поперечного сечения шва, выполненного односторонней сваркой ТИГ на пластине из сплава LF6 толщиной 4 мм на следующем режиме: $I_{св} = 120$ А; $v_{св} = 5$ мм/с

ширина шва в верхней части составляет около 8 мм, глубина проплавления — 3,3 мм. Для полного проплавления шва необходимо увеличить сварочный ток или уменьшить скорость сварки, можно также повторно выполнить шов с обратной стороны свариваемого изделия практически на том же режиме. При двухсторонней дуговой сварке полное проплавление получают при относительно невысоком сварочном токе. На рис. 3 показан шов, выполненный на сварочном токе 65 А, остальные параметры такие же, как на рис. 4. Имело место полное проплавление шва, ширина шва как в верхней, так и в нижней его части составляла около 4,7 мм;

более низкой подводимой энергией и более высокой производительностью. По сравнению с односторонней сваркой ТИГ при двухсторонней сварке расход энергии и время сварки меньше. Для сравнения этих двух способов сварки выполняли стыковое соединение из алюминиевого сплава длиной 1000 мм и толщиной 6 мм. При односторонней сварке ТИГ, необходимо выполнить предварительную разделку кромок или осуществлять процесс по зазору, но с двух сторон. При этом сварочный ток $I_{св}$ обычно составляет 200...270 А, а скорость сварки $v_{св} = 150...250$ мм/мин [1]. В данном случае берутся средние значения этих параметров: $I_{св} = 235$ А; $v_{св} = 200$ мм/мин. Таким образом, можно рассчитать время сварки — $2 \cdot 1000 / 200 = 10$ мин, при этом время на подготовку кромок не учитывается. Предположим, что $U_{д} = 15$ В. Тогда подводимая энергия равна $I_{св} \times U_{д} \times t = 235 \times 15 \times 10 \times 60 = 2115$ кДж. Если это соединение выполнять двухсторонней сваркой ТИГ, то $I_{св} = 100$ А, $v_{св} = 300$ мм/мин. Представленный на рис. 2 макрошлиф поперечного сечения шва получен при двухсторонней сварке в течение $1000 / 300 = 3,33$ мин. Также можно предположить, что в этом случае напряжение на обеих дугах составляло 15 В, отсюда подводимая энергия равна $2 \times 100 \times 15 \times 3,33 \times 60 = 600$ кДж. Благодаря сокращению времени сварки и расхода энергии производительность сварки можно увеличить в несколько раз;

меньшей степенью деформации. Обнаружено, что при двухсторонней сварке ТИГ поперечная угловая деформация свариваемого изделия меньше. По теории сварочных деформаций неоднородные

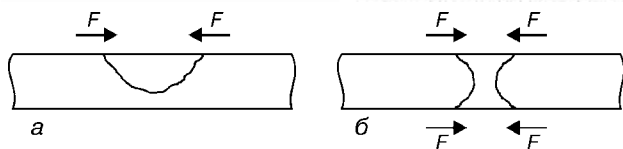


Рис. 5. Силы F , действующие на сварное соединение при поперечной деформации, в случае односторонней (а) и двухсторонней (б) сварки ТИГ

распределения поперечной усадки шва по его толщине вызывают угловую деформацию. В процессе сварки происходит расширение металла и повышение температуры вблизи сварочной ванны, этому препятствует холодный металл, вследствие чего возникает деформация. При охлаждении металла происходит поперечная усадка. В одностороннем шве поперечная деформация больше в его верхней части и меньше в нижней, из-за чего образуется угловой прогиб соединения. Угловые деформации влияют на качество соединения, поэтому необходимо принимать меры по их уменьшению или устранению.

При двухсторонней сварке ТИГ источники нагрева находятся по обе стороны от соединения, поэтому угловые усадки шва симметричны, а угловая деформация меньше. Между тем, при односторонней сварке шов получается более узким, зона воздействия высокой температуры также сужается, что способствует уменьшению угловой деформации. На рис. 5 показаны силы, действующие на сварное соединение при поперечной деформации;

более долгим сроком службы электродов. При сварке алюминиевых сплавов способом ТИГ необходимо принимать меры по удалению оксидных пленок. Для этого обычно используют переменный ток, что ускоряет износ электрода, особенно при автоматической сварке. Изнашивание электрода напрямую связано со сварочным током — чем больше ток, тем быстрее изнашивание электрода. Вместо обычной сварки ТИГ соединение можно выполнить двухсторонней сваркой ТИГ, при которой используется относительно невысокий ток, что продлевает срок службы электрода.

Однако применение двухсторонней сварки ТИГ имеет ряд ограничений. Поскольку с обратной сто-

роны свариваемого изделия размещается вторая сварочная горелка, необходимо дополнительное пространство, что ограничивает применение этого способа сварки.

Механизм проплавления двухсторонней сварки ТИГ. Наиболее часто стремятся получать швы с большим коэффициентом формы, благоприятной структурой и требуемыми механическими свойствами. Чтобы увеличить коэффициент формы шва, можно использовать процесс с высокой плотностью энергии, например электронно-лучевую или лазерную сварку. Но из-за высокой стоимости эти способы сварки имеют ограниченное применение. Из всего изложенного выше следует, что благодаря применению двухсторонней дуговой сварки можно получить высокий коэффициент формы шва при небольшой подводимой энергии. Теоретический анализ позволяет высказать следующие соображения для объяснения этого факта:

поскольку источники нагрева расположены по обе стороны от свариваемого изделия, в области двух сварочных ванн происходит концентрация тепловой энергии при небольшом количестве подводимого тепла;

при прохождении сварочного тока непосредственно через зону сварки создаются значительные электромагнитные силы, которые вызывают сильный конвективный поток в сварочной ванне, что усиливает проплавление;

при двухсторонней сварке ТИГ выталкивающая сила в нижней части сварочной ванны положительно влияет на глубину проплавления.

Далее эти положения проанализированы с помощью экспериментов и математического моделирования.

Влияние направления сварочного тока. При обычной сварке ТИГ сварочный ток течет от одного зажима источника питания через сварочную горелку, дугу и свариваемое изделие ко второму зажиму. При двухсторонней сварке ТИГ он проходит непосредственно через зону сварки свариваемого изделия, затем через вторую горелку и возвращается к источнику питания. Благодаря большей плотности сварочного тока в зоне сварки, особенно в сварочной ванне, создается сильное электромагнитное поле и происходит конвекция металла в различных направлениях.

Из рис. 6 видно, что значения электромагнитных сил больше, если используется один источник питания, особенно в центре свариваемого изделия [6].

Формирование зоны концентрации тепла. На проплавление шва оказывают влияние многие факторы. Обычно, чем выше сварочный ток, тем глубже проплавление шва. Между тем, глубина проплавления зависит от материала и толщины свариваемого изделия: чем больше теплоемкость материала, тем больше тепла требуется для того, чтобы повысить температуру при данном объеме металла до такого значения, чтобы получить мелкую и узкую сварочную ванну. Толщина

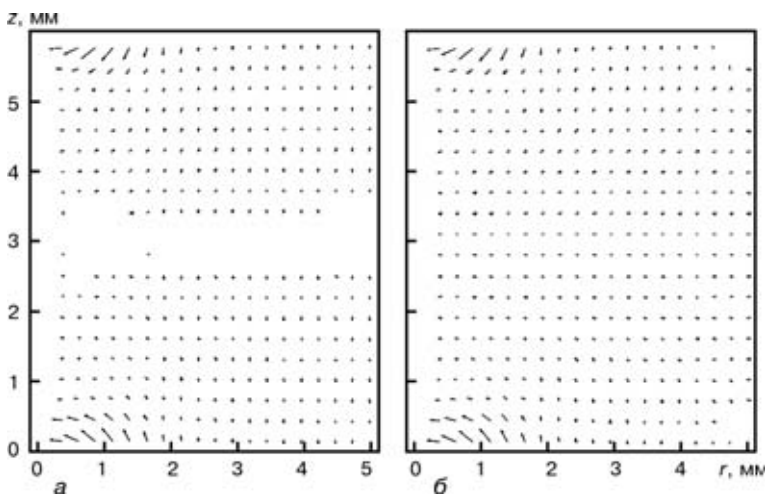


Рис. 6. Распределение электромагнитных сил в свариваемом изделии при двухсторонней сварке ТИГ на токе 110 А с двумя (а) и одним (б) источниками питания

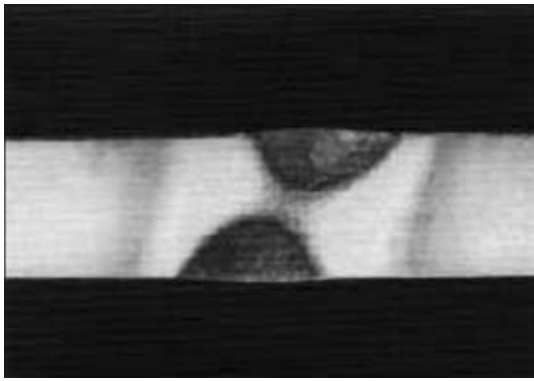


Рис. 7. Макрошлиф поперечного сечения шва, выполненного сваркой ТИГ на токе 110 А при смещении горелок на 5 мм

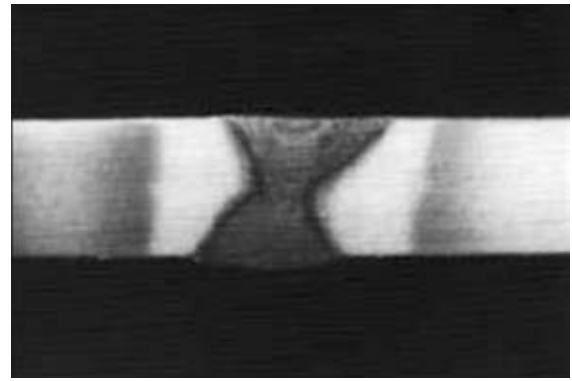


Рис. 9. Макрошлиф поперечного сечения шва, выполненного сваркой ТИГ на токе 120 А

свариваемого изделия влияет на подвод тепла: чем больше толщина изделия, тем более мелкая и узкая образуется сварочная ванна. Когда глубина проплавления превышает 60 % толщины свариваемого изделия, происходит накопление тепла в нижней части сварочной ванны, вследствие чего глубина проплавления увеличивается. При односторонней сварке слой металла под сварочной ванной достаточно тонкий, подвод тепла больше, чем его рассеяние, поэтому происходит накопление тепла, благодаря чему быстро увеличивается глубина проплавления. При двухсторонней сварке ТИГ при подводе тепла в свариваемое изделие сварочные ванны образуются с обеих сторон. В образовавшуюся между ними зону подводится тепло от двух дуг, температура быстро повышается и формируется зона концентрации тепла.

Металл в этой зоне имеет очень высокую температуру. Совсем немного тепла нужно для того, чтобы его расплавить, что резко увеличивает глубину проплавления каждой из сварочных ванн. Затем зона концентрации тепла исчезает, две сварочные ванны соединяются и происходит полное проплавление шва.

Для подтверждения изложенного выше проведены следующие эксперименты. Сварочные горелки смещались относительно друг друга перпендикулярно направлению сварки. При наличии зоны концентрации тепла сварочные ванны увеличиваются вдоль линии, соединяющей центры двух дуг. На рис. 7 представлен макрошлиф поперечного сечения шва при смещении горелок на 5 мм перпендикулярно направлению сварки. В эксперименте использовано сварное изделие из алюминиевого сплава LY12 толщиной 6 мм, скорость сварки составляла 5 мм/с, сварочный ток — 110 А, напряжение на обоих дугах — 15 В. На рис. 8 пред-

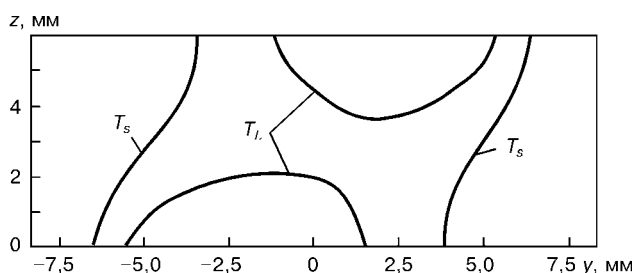


Рис. 8. Результаты расчетов, полученные при смещении горелок на 5 мм

ставлены результаты моделирования процесса сварки ТИГ, осуществляемого с использованием тех же параметров.

Из рисунка видно, что проплавление шва частичное, обе сварочные ванны вытянуты вдоль осевой линии дуг, что свидетельствует о формировании зоны концентрации тепла между сварочными ваннами. Наличие зоны концентрации тепла ускоряет процесс увеличения размеров сварочной ванны. На рис. 9 представлен макрошлиф поперечного сечения шва, выполненного сваркой ТИГ на токе 120 А, остальные параметры оставались такими же, как на рис. 7.

Влияние выталкивающей силы. Выталкивающая сила представляет собой разновидность силы, которая возникает в жидком металле вследствие разницы значений его плотности. В сварочной ванне эта разница вызвана температурным градиентом, который является причиной естественной конвекции в жидком металле.

При обычном способе сварки выталкивающая сила также играет важную роль в перемещении потока жидкого металла, но менее важную, чем поверхностное натяжение и электромагнитные силы. В данном случае выталкивающая сила вызывает течение жидкого металла, направленное вверх вдоль осевой линии сварочной ванны, что препятствует проплавлению шва.

Если проплавление шва при двухсторонней сварке ТИГ происходит частично, то в верхней сварочной ванне выталкивающая сила оказывает тот же эффект, что и при односторонней сварке, препятствует проплавлению шва. Но в нижней сварочной ванне этот эффект имеет иной характер: выталкивающая сила вызывает течение жидкого металла, направленное вверх вдоль осевой линии сварочной ванны. Направленный внутрь поток переносит жидкий металл с высокой температурой во внутреннюю часть сварочной ванны. Как и электромагнитные силы, этот эффект оказывает положительное влияние на проплавление шва.

На рис. 10 показано поле направления течения жидкого металла при двухсторонней сварке ТИГ, формирующееся при действии только выталкивающей силы. В обеих сварочных ваннах выталкивающая сила создает различные жидкие потоки металла, поэтому верхняя и нижняя сварочные ванны увеличиваются в противоположных направлениях. Благодаря этому нижняя сварочная ванна формируется быстрее, при

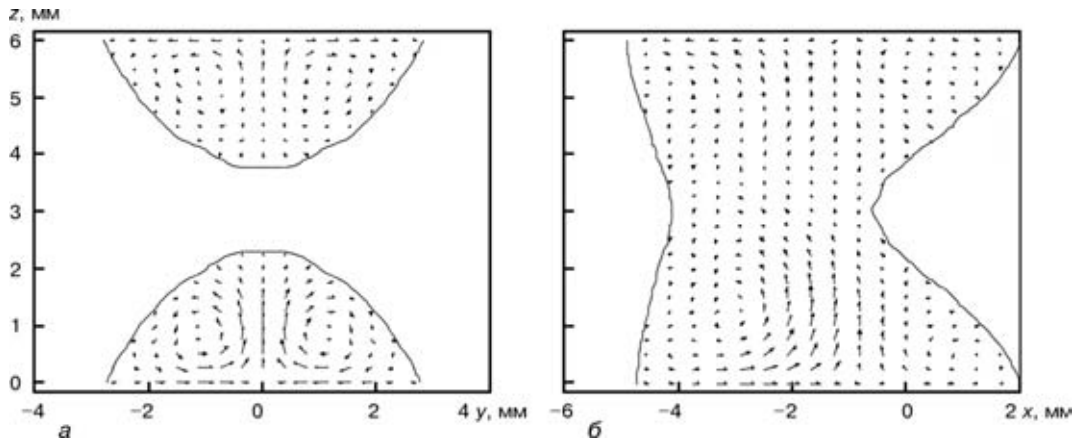


Рис. 10. Поле течения жидкости в течение 4 с при действии только выталкивающей силы при двухсторонней сварке ТИГ: $I_{\text{св}} = 110$ А; $U = 15$ В; $v_{\text{св}} = 10$ мм/с: *a* — поперечное, *б* — продольное сечение

этом она глубже, чем верхняя сварочная ванна, которая с свою очередь будет шире.

Выводы

1. При двухсторонней сварке ТИГ сварочный ток проходит непосредственно через зону сварки, что приводит к его концентрации, формированию электромагнитных сил и вызывает более интенсивный поток жидкости в сварочной ванне, способствуя процессу проплавления.

После частичного проплавления, между нижними частями двух сварочных ванн возникает зона накопления тепла с возрастанием температуры даже при меньшем количестве подводимого тепла.

2. Выталкивающая сила вызывает в нижней сварочной ванне поток, направленный внутрь, благодаря которому горячая жидкость перемещается

с поверхности сварочной ванны к ее дну и формирует более глубокую сварочную ванну.

1. *Welding handbook*. — Welding process and equipment. — Chinese machine press, 1995. — Vol. 1.
2. *Chen Yuchuan*. New welding techniques development in boiler manufacturing // Proc. of the 7th National annual welding conference, 1993, Qingdao, China. — Qingdao, China, 1993. — Vol. 1. — P. 26–36.
3. *Zhang Y. M., Zhang S. B.* Double-sided arc welding increases weld joint penetration // *Welding J.* — 1998. — June. — P. 57–61.
4. *Zhang Y. M., Zhang S. B.* Welding aluminum alloy 6061 with the opposing dual-torch GTAW process // *Ibid.* — 1999. — June. — P. 202–206.
5. *Zhang Y. M., Pan C., Male A. T.* Improved microstructure and properties of 6061 aluminum alloy weldments using a double-sided arc welding process // *Metall. and Mater. Trans.* — 2000. — **31A**. — P. 2537–2543.
6. *Cao H. M.* Research on the mechanism of double-sided arc welding process and the numerical simulation of temperature and fluid flow fields: Ph. D. thesis. — Harbin: Harbin Inst. of Technology, 2001.

Using theoretical analysis, experiments and numerical modelling, a mechanism of penetration of a doubled-sided TIG welding has been investigated. The results show that the welding current passes directly through the zone of welding, leads to a concentrated distribution of current, forms the stronger electromagnetic field and causes the stronger fluidity in the weld pool that contributes to penetration. In the process of TIG double-sided welding a zone of heat accumulation is formed at a partial penetration of weld between lower parts of two weld pools, where temperature can be quickly increased even at a small amount of heat supplied. In the lower weld pool, the forcing out force creates the flow directed inside, which can displace the hot fluid from the weld pool surface to its lower part, thus forming a deep weld pool.

Поступила в редакцию 10.07.2003