



## РОЛЬ ПАРОГАЗОВОГО КАНАЛА В ФОРМИРОВАНИИ ГЛУБОКОГО ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ А-ТИГ СВАРКЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **Д. В. КОВАЛЕНКО**, инж.,  
чл.-кор. НАН Украины **И. В. КРИВЦУН**, **В. Ф. ДЕМЧЕНКО**, д-р техн. наук, **И. В. КОВАЛЕНКО**, инж.  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлены результаты экспериментальных исследований геометрических размеров и формы поверхности сварочной ванны при ТИГ и А-ТИГ сварке поверхностной дугой при неполном проплавлении нержавеющей стали типа 12Х18Н10Т (304Н). Высказано предположение о том, что одной из причин глубокого проплавления при А-ТИГ сварке является формирование парогазового канала и связанное с этим изменение интенсивности конвекции Марангони. Характерные для А-ТИГ сварки формы свободной поверхности и дна сварочной ванны подтверждают существование предложенного механизма глубокого проплавления.

*Ключевые слова:* ТИГ и А-ТИГ сварка, дуга, сварочная ванна, проплавление, парогазовый канал, конвекция Марангони, нержавеющая сталь

А-ТИГ сварка (ТИГ сварка по слою активирующего флюса) является достаточно простой и эффективной альтернативой ТИГ сварке, а также плазменной, лазерной и электронно-лучевой сварке. При сварке поверхностной дугой глубина проплавления повышается более чем в 3 раза по сравнению с ТИГ сваркой. Способ А-ТИГ сварки позволяет сваривать различные металлы за один проход без разделки кромок и использования присадочной проволоки, в частности, выполнять стыковые соединения при односторонней сварке сталей малой и средней толщины (от 1 до 12 мм), двусторонней сварке сталей толщиной от 6 до 25 мм, а также корневые швы в разделку с увеличенным притуплением кромок (4...6 мм). Кроме того, А-ТИГ сварка дает возможность получать швы одинакового размера и качества при сварке сталей одной марки, но различной выплавки, а также обеспечивать более низкие значения деформации и усадки сварных соединений [1–4].

В настоящее время существуют различные гипотезы о причинах и механизмах более глубокого проплавления при А-ТИГ сварке по сравнению с ТИГ процессом. Предлагаемые гипотезы можно объединить в две основные группы:

изменение характера и структуры гидродинамических потоков в сварочной ванне в зависимости от направления течения Марангони [5, 6], а также повышения роли пондеромоторных (лоренцевых) сил при формировании течения расплавленного металла [7, 8];

контрагирование дуги за счет электроотрицательных элементов и изоляционного действия ак-

тивирующего флюса, и обусловленные этим повышение плотности тока и соответственно концентрации теплового воздействия дуги на поверхности сварочной ванны [2, 9–11].

Проведенные нами ранее [12] исследования ТИГ и А-ТИГ сварки нержавеющей стали 304Н (при использовании аэрозольного оксидного активатора ПАТИГ С-А) показали, что с увеличением тока дуги происходит перераспределение влияния механизмов глубокого проплавления (первая и вторая гипотезы) на проплавляющую способность А-ТИГ сварки. В частности, контрагирование дуги оказывается наиболее значительным фактором при сварке на низких (до 100 А) токах. С повышением тока от 100 до 150 А влияние контрагирования дуги на глубину проплавления и формирование шва ослабляется более чем в 2 раза в общем балансе механизмов, обуславливающих глубокое проплавление при А-ТИГ сварке.

Обычно исследования процесса проплавления свариваемого металла проводятся на основе анализа размеров сварных швов (глубины проплавления, ширины и коэффициента формы шва). Вместе с тем, в литературе, освещающей вопросы А-ТИГ сварки, не уделяется достаточного внимания деформации свободной поверхности жидкого металла, которая, на наш взгляд, может оказывать существенное влияние на формирование сварного шва.

В настоящей работе на основе анализа экспериментальных данных о геометрии поверхности сварочной ванны при ТИГ и А-ТИГ сварке нержавеющей стали 304Н с неполным проплавлением выдвигается гипотеза об образовании квазипарогазового канала при А-ТИГ сварке поверхностной дугой и его роли в интенсификации конвективного

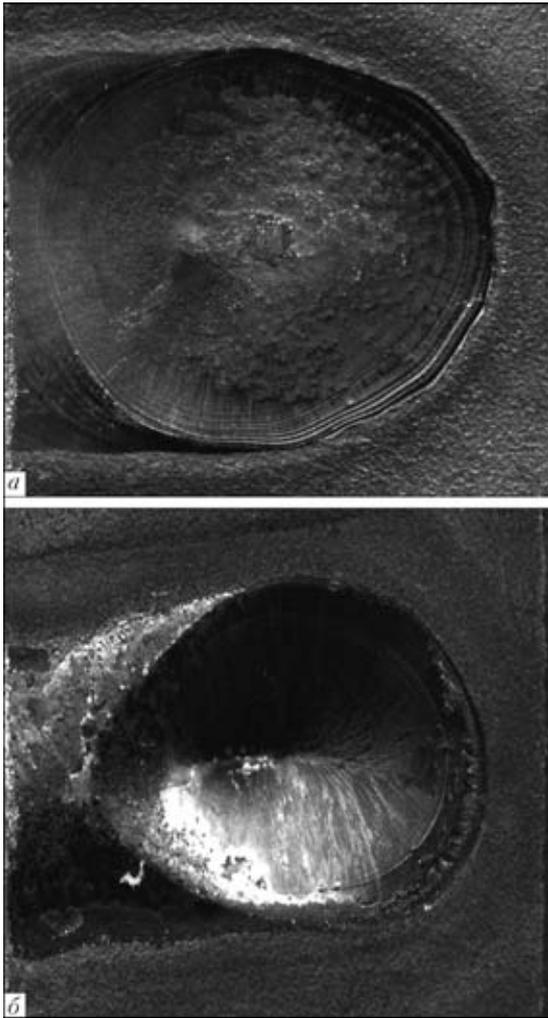


Рис. 1. Внешний вид (сверху) поверхности застывших сварочных ванн при ТИГ (а) и А-ТИГ сварке (б) при  $I_{св} = 200$  А

переноса тепла в расплавленном металле, обеспечивающего глубокое проплавление.

**Результаты экспериментальных исследований.** Сварочные эксперименты выполняли на пластинах размером 150×50×9 мм из нержавеющей стали 304Н (0,006 % S, 0,006 % O). Перед А-ТИГ сваркой на поверхность пластины наносили равномерный контролируемый слой активатора (-оксида) шириной 5 мм и толщиной 20 мкм. Толщину слоя активатора контролировали специальным толщиномером ТП-34 на основе вихретокового преобразователя. В качестве активаторов использовали в отдельности следующие оксидные соединения:  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $SrO$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $CoO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Ga_2O_3$ ,  $In_2O_3$ ,  $GeO_2$ ,  $SnO_2$ ,  $V_2O_5$ ,  $MoO_3$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ .

Эксперименты проводили на сварочной установке ОБ-2279 для ТИГ сварки с тиристорным источником питания ВСВУ-315.

При проведении экспериментов использовали следующий режим сварки: ток сварки — 100, 150 и 200 А; длина дуги — 1,5 мм (установочное расстояние от конца вольфрамового электрода до поверхности пластины перед сваркой); скорость

сварки — 100 мм/мин; защитный газ — аргон; применяли вольфрамовый электрод (2 % Th) диаметром 3,2 мм, угол заточки составлял 30°, притупление — 0,5 мм.

Исходя из сложности контроля очертаний и измерения размеров поверхности жидкой ванны непосредственно в процессе сварки использовали следующую методику. Во время сварки осуществляли мгновенный обрыв дуги путем выключения источника питания и остановку перемещения образца относительно вольфрамового электрода. Форму затвердевшей поверхности металла в первом приближении можно рассматривать как очертания свободной поверхности жидкой сварочной ванны. Анализ этой формы и измерение геометрических размеров ее поверхности проводили на макрошлифах образца, вырезанных как поперек шва в зоне центра кратера, так и в продольном сечении шва.

Внешний вид поверхности затвердевших сварочных ванн ТИГ и А-ТИГ при сварке представлен на рис. 1, а. Соответствующие макрошлифы, вырезанные из поперечного и продольного сечения швов, на рис. 2. Для анализа профилей дна и свободной поверхности сварочной ванны в продольном сечении шва будем использовать общую схему расположения электрода относительно ванны и ее характерные геометрические размеры при ТИГ и А-ТИГ сварке (рис. 3). Значения представленных на этом рисунке геометрических параметров для различных режимов сварки приведены в таблице.

При сравнении очертаний поверхностей продольных и поперечных размеров сварочных ванн при ТИГ и А-ТИГ сварке выявилось их значительное отличие (см. рис. 1, 2 и таблицу), что свидетельствует, по-видимому, о различных механизмах проплавления при указанных способах сварки. В частности, анализ размеров и формы наружной поверхности затвердевших ванн при ТИГ и А-ТИГ сварке показал следующее. Передняя и хвостовая часть поверхности сварочной ванны при А-ТИГ сварке имеют выпуклую форму с четко выраженным характерным углублением (лункой) вблизи центра кратера (см. рис. 1, б и 2, б, з), что особенно заметно в поперечном сечении шва (рис. 2, б). Такого существенного углубления при ТИГ сварке не наблюдается (рис. 1, а и 2, а, в). С повышением тока дуги глубина этой лунки увеличивается при использовании всех исследованных оксидов. Вместе с тем, при одном и том же значении тока эта глубина отличается в случае использования различных оксидов. По степени увеличения глубины кратера  $H_{кр}$  с одновременным повышением глубины проплавления  $H_{пр}$  оксиды можно расположить в следующем порядке: отличающиеся более низкой ( $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $SrO$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $CoO$ ,  $Fe_2O_3$ ) и более высокой ( $Ga_2O_3$ ,

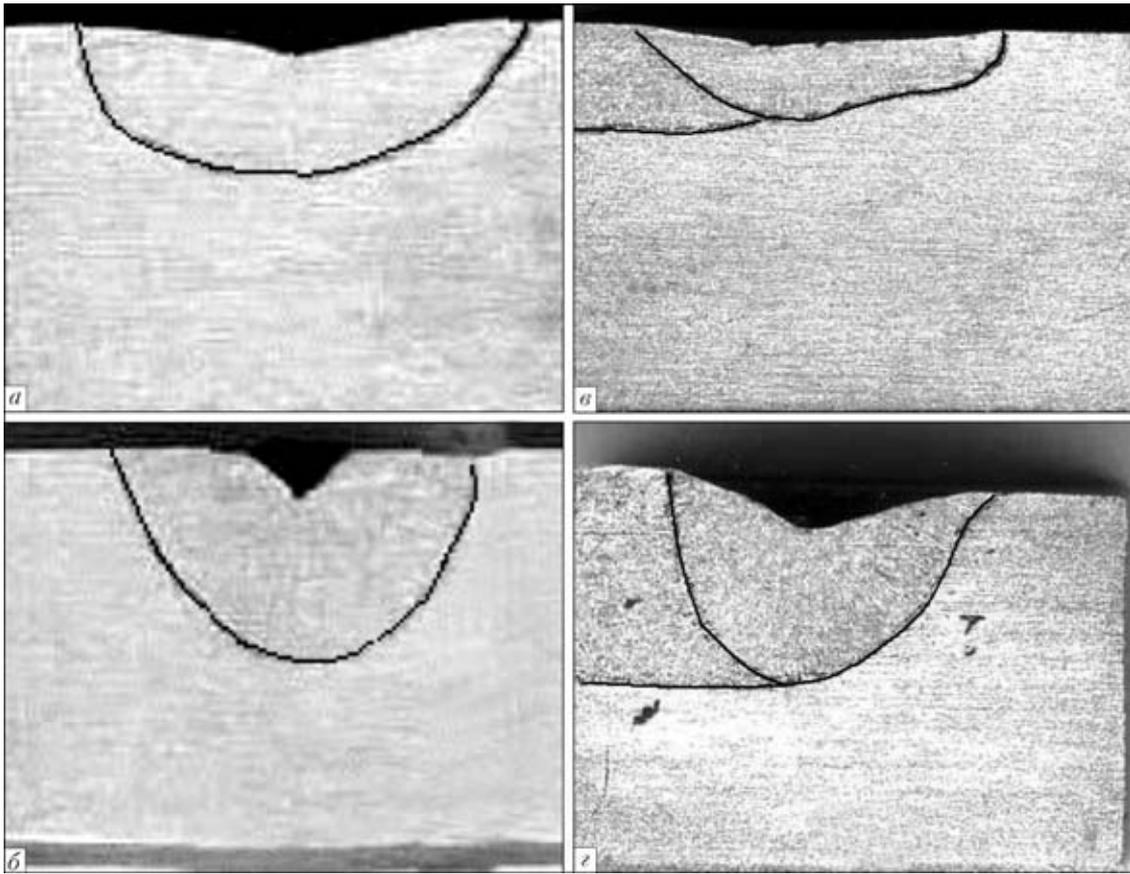


Рис. 2. Поперечное (а, б) и продольное (в, з) сечения застывших сварочных ванн при ТИГ (а, в) и А-ТИГ сварке (б, з) ( $I_{св} = 150$  А)

$In_2O_3$ ,  $GeO_2$ ,  $SnO_2$ ,  $V_2O_5$ ,  $MoO_3$ ,  $TiO_2$ ,  $SiO_2$ ) степень проплавления. Изменение  $H_{кр}$  и  $H_{пр}$  при использовании трех характерных оксидов ( $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ) приведены на рис. 4.

Анализ продольных шлифов швов, выполненных ТИГ и А-ТИГ сваркой, показал следующее. Как при ТИГ, так и при А-ТИГ сварке положения точек максимального прогиба (лунки кратера) по-

верхности сварочной ванны  $L_{H_{кр}}$  и максимальной глубины проплавления  $L_{H_{пр}}$  смещены по отношению к оси вольфрамового электрода в сторону хвостовой части ванны. В случае А-ТИГ сварки это смещение увеличивается при повышении тока сварки, а также изменяется в зависимости от типа используемого оксида. Однако при всех прочих равных условиях оно меньше, чем в случае ТИГ сварки. На рис. 5 схематически представлены результаты анализа при  $I_{св} = 200$  А.

**Обсуждение результатов экспериментальных исследований.** Проанализируем приведенные выше результаты экспериментальных исследований с точки зрения возможного механизма глубокого проплавления при А-ТИГ сварке. Из двух факторов, обуславливающих деформацию свободной поверхности сварочной ванны — газодинамического давления столба дуги и давления отдачи паров — рассмотрим сначала первый. Как известно, движение плазмы столба дуги происходит под воздействием ротационной составляющей силы Лоренца, которая в условиях осевой симметрии электромагнитного поля в столбе дуги является центростремительной (направлена к оси столба дуги). При ТИГ сварке эпюра распределения магнитного давления по высоте столба имеет максимум вблизи катода, где плотность тока максимальна. Вследствие этого в столбе дуги

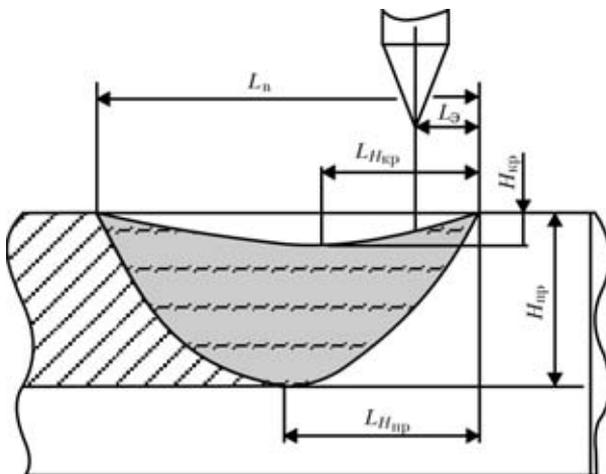


Рис. 3. Схема измерения характерных размеров сварочной ванны при ТИГ и А-ТИГ сварке:  $L_в$  — длина ванны;  $L_з$  — расстояние от переднего края ванны к оси электрода;  $L_{H_{кр}}$ ,  $L_{H_{пр}}$  — расстояние от переднего края ванны до точки максимальной глубины соответственно кратера и проплавления;  $H_{кр}$ ,  $H_{пр}$  — глубина соответственно кратера и проплавления



**Режимы сварки и геометрические размеры сварочных ванн при ТИГ и А-ТИГ сварке стали 304Н толщиной 9 мм**

Способ сварки (оксид)	$I_{св}$ , А	$L_b$ , мм	$H_{кр}$ , мм	$L_3$ , мм	$L_{H_{кр}}$ , мм	$L_{H_{пр}}$ , мм	$H_{пр}$ , мм
ТИГ	100	5,5	0,20	2,5	3,2	3,9	1,0
А-ТИГ (TiO <sub>2</sub> )	100	4,5	0,50	1,6	2,1	3,0	2,2
ТИГ	150	8,2	0,35	3,0	5,5	6,7	2,5
А-ТИГ (TiO <sub>2</sub> )	150	7,5	1,20	2,0	4,6	5,5	5,7
ТИГ	200	11,5	0,50	3,6	9,5	10,0	3,1
А-ТИГ (TiO <sub>2</sub> )	200	9,0	1,50	2,5	8,0	7,7	6,2

формируется поток плазмы в аксиальном направлении (от катода к аноду), который при взаимодействии с поверхностью сварочной ванны растекается, образуя характерную колоколообразную форму дуги. Возникающее в прианодной области газодинамическое давление в определенной мере способствует деформации свободной поверхности сварочной ванны. Иначе обстоит в случае А-ТИГ сварки. Принято считать, что при сварке по слою активирующего флюса происходит контрагирование дуги, которое проявляется в уменьшении площади анодного пятна до размеров, сопоставимых с площадью катодной области. При этом распределение плотности тока по высоте столба дуги имеет два максимума, расположенных вблизи катода и анода. Аналогичный характер имеет также распределение ротационной составляющей силы Лоренца, в связи с чем возникают два встречных потока плазмы, направленных от катода и анода к средней (по высоте) части столба. В результате их взаимодействия наблюдается бочкообразная форма факела с максимумом давления в месте столкновения потоков плазмы. Таким образом, газодинамическое давление столба дуги как фактор деформации свободной поверхности сварочной ванны при А-ТИГ сварке следует исключить. Отметим, что о явлении контрагирования дуги при А-ТИГ сварке можно говорить лишь с определенной сте-

пенью условности, понимая под этим термином прежде всего уменьшение площади анодного пятна.

При анализе влияния эффекта контрагирования дуги на глубину проплавления рассмотрим два характерных случая. При А-ТИГ сварке на низких (до 100 А) токах формируется ванна небольшого поперечного сечения. Образующаяся при этом сила поверхностного натяжения, пропорциональная радиусу кривизны поверхности, превалирует над давлением реакции отдачи паров, вследствие чего деформация свободной поверхности сварочной ванны затруднена. Поэтому основным фактором, определяющим проплавление основного металла при сварке на малых токах, является перенос тепла из перегретой области, находящейся вблизи анодного пятна, в глубь металла в соответствии с механизмом теплопроводности и конвекцией, развивающейся в поле массовых сил (силы Лоренца и Архимеда).

При повышенных (от 100 до 200 А) токах эффект контрагирования дуги и связанное с ним локальное повышение температуры поверхности сварочной ванны в пределах анодного пятна не могут обеспечить такого существенного увеличения глубины, которое наблюдается при А-ТИГ сварке. По нашему мнению, для увеличения глубины проплавления в этом случае требуется не только перегреть приповерхностный слой металла, но и обеспечить условия для деформации свободной поверхности расплава с тем, чтобы приблизить источник тепла ко дну ванны (по аналогии со сваркой высококонцентрированными источниками энергии — лазерной и электронно-лучевой [13, 14]). В случае небольшой площади свободной поверхности сварочной ванны подобная деформация затруднена из-за высокого уровня сил поверхностного натяжения. Такие условия реализуются при интенсивном испарении металла с поверхности сварочной ванны за счет реакции отдачи струи расширяющегося пара и снижения коэффициента поверхностного натяжения расплава в перегретой области. Благодаря контрагиро-

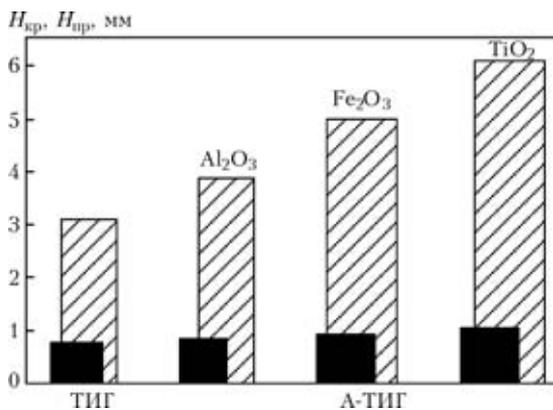


Рис. 4. Влияние ТИГ и А-ТИГ процесса сварки с использованием различных оксидов на глубину кратера  $H_{кр}$  (черная область) и проплавления  $H_{пр}$  (заштрихованная) сварочных ванн при  $I_{св} = 200$  А

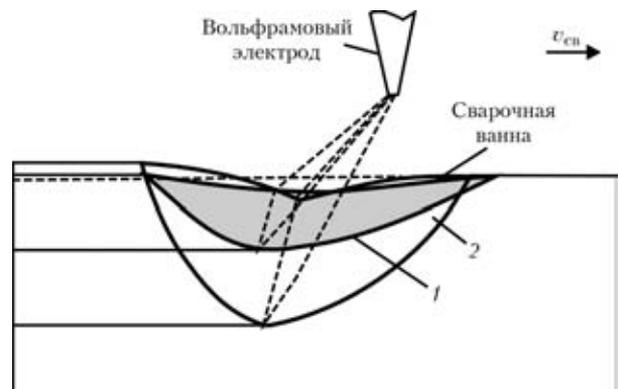


Рис. 5. Схема продольных сечений застывших сварочных ванн при ТИГ (1) и А-ТИГ сварке (2) ( $I_{св} = 200$  А)



ванию дуги при А-ТИГ сварке вполне вероятно, что соответствующее увеличение плотности теплового потока на аноде способно обеспечить локальный перегрев и испарение расплавленного металла и привести к существенному искривлению поверхности сварочной ванны и образованию квазипарогазового канала [15].

С помощью экспериментальных исследований установлено [16], что вследствие контрагирования дуги при А-ТИГ сварке на сварочном токе 200 А плотность теплового потока составляет  $1 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> и выше. Известно, что для интенсивного испарения металла его поверхность необходимо нагреть источником, имеющим плотность теплового потока в пятне нагрева порядка  $1 \cdot 10^5 \dots 1 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> [14]. Хотя плотность теплового потока в анодном пятне при А-ТИГ сварке остается ниже той, которая достигается при лучевых способах сварки (мощность дуги распределяется на свободной поверхности сварочной ванны в пятне гораздо больших размеров, чем типичное фокусное пятно), однако, с нашей точки зрения, она может оказаться достаточной для того, чтобы обеспечить перегрев поверхности расплава до температуры, близкой к температуре кипения, и выше. Вследствие этого металл сварочной ванны интенсивно испаряется, а ее свободная поверхность под воздействием реакции отдачи паров деформируется, образуя кратер и парогазовый канал [16], в котором происходят процессы разлета и конденсации пара, аналогичные тем, которые протекают в узких и глубоких парогазовых каналах при электронно-лучевой и лазерной сварке, хотя они и выражены не так ярко. В этом отношении А-ТИГ сварка на повышенных токах занимает промежуточное положение между дуговыми и лучевыми способами сварки.

Данные о проплавляющей способности ТИГ и А-ТИГ сварки, приведенные на рис. 4, свидетельствуют о том, что приращение глубины проплавления при А-ТИГ сварке существенно больше максимального прогиба свободной поверхности. Поэтому в силу местного влияния глубокое проплавление при А-ТИГ сварке не может объясняться только как результат заглупления источника тепла (анодного пятна) и приближения его ко дну сварочной ванны. Вероятнее всего, существует и другой механизм, обеспечивающий такое проплавление.

Для дальнейшего исследования механизма глубокого проплавления при А-ТИГ сварке обратимся к конвекции Марангони, которая возникает под воздействием поверхностной капиллярной силы, образующейся вследствие градиента коэффициента поверхностного натяжения вдоль поверхности сварочной ванны. В отличие от ТИГ сварки, при которой действие капиллярной силы направлено в сторону, противоположную градиенту темпера-

туры — от центра к периферии ванны, при А-ТИГ сварке в результате активации свободной поверхности расплава капиллярная сила действует в противоположном направлении [5, 6]. Под ее действием в приповерхностном слое сварочной ванны возникает течение расплава, которое при сварке А-ТИГ направлено к тепловому центру свободной поверхности ванны (к центру анодного пятна). Если свободная поверхность сварочной ванны незначительно искривлена, то потоки расплава, движущиеся к центру ванны навстречу друг другу, при столкновении теряют импульс, вследствие чего нисходящий поток расплава становится слабоинтенсивным (рис. 6, а), а образующееся вихревое течение, локализованное в верхней части сварочной ванны, оказывает в ограниченной степени влияние на глубину проплавления. Гидродинамическая обстановка в сварочной ванне существенно изменяется, если в результате реакции отдачи паров на поверхности ванны образовался парогазовый канал. В этом случае движущиеся вдоль наклонной поверхности канала потоки расплава встречаются под углом  $\alpha \approx 45^\circ$  (а, возможно, и больше). В результате гидродинамического взаимодействия этих потоков их импульсы суммируются, образуя интенсивное нисходящее струйное течение (рис. 6, б), которое способно эффективно транспортировать перегретый металл ко дну ванны, обеспечивая тем самым существенное повышение глубины проплавления. Таким образом, парогазовый канал можно рассматривать как геометрический фактор активации течения Марангони, интенсифицирующий нисходящий поток перегретого расплава ко дну сварочной ванны. Вблизи дна ванны этот поток разворачивается в сторону боковых стенок сварочной ванны. Имеющая

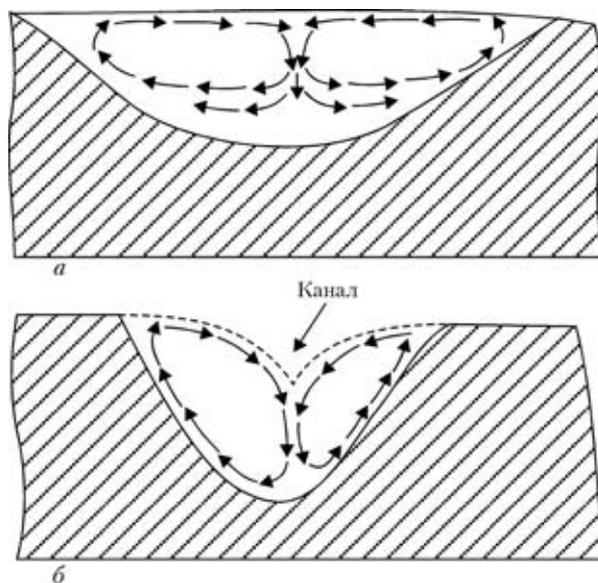


Рис. 6. Схематическое изображение конвекции Марангони в случае плоской (а) и искривленной (б) поверхности сварочной ванны



место в отдельных экспериментах бочкообразная форма поперечного сечения шва, по всей вероятности, связана с тем, что возвратный поток расплава сохраняет температуру, достаточную для подплавления боковых кромок.

Предложенный механизм глубокого проплавления при А-ТИГ сварке требует дальнейших исследований, направленных на прецизионное определение плотности тока в анодном пятне и формы свободной поверхности сварочной ванны, фиксацию реальных очертаний квазипарогазового канала в процессе сварки. Несомненный интерес представляет также математическое моделирование 3D процессов тепломассопереноса и гидродинамики сварочной ванны с учетом взаимодействия массовых и капиллярных сил, деформации свободной поверхности, испарения и конденсации вещества, а также особенностей горения дуги в условиях А-ТИГ сварки. Модель такой структуры позволит дать количественную оценку роли парогазового канала и конвекции Марангони в формировании глубокого проплавления при А-ТИГ сварке.

#### Выводы

1. При А-ТИГ сварке на свободной поверхности сварочной ванны образуется характерный кратер с углублением (лункой), расположенным вблизи центра поверхности ванны. С повышением тока дуги это углубление становится более узким и вытянутым в продольном сечении шва, что обычно наблюдается при сварке высококонцентрированными источниками нагрева с образованием парогазового канала, а также увеличивается глубина кратера и проплавления при использовании всех исследованных оксидов.

2. Установлено, что, как при ТИГ, так и А-ТИГ сварке, положение точек максимального прогиба поверхности сварочной ванны и максимальной глубины проплавления смещены по отношению к оси вольфрамового электрода в сторону хвостовой части ванны. В случае А-ТИГ сварки это смещение при всех прочих равных условиях меньше, чем при ТИГ сварке.

3. Высказано мнение, что гидродинамическое взаимодействие потоков расплава, вызванных градиентом поверхностного натяжения, в условиях деформированной свободной поверхности сварочной ванны (А-ТИГ сварка на больших токах) при-

водит к образованию интенсивного нисходящего течения, которое транспортирует перегретый металл из анодного пятна ко дну сварочной ванны, обеспечивая тем самым существенное увеличение глубины проплавления.

1. Ющенко К. А., Коваленко Д. В., Коваленко И. В. Применение активаторов при дуговой сварке вольфрамовым электродом в инертных газах (А-ТИГ) сталей и сплавов // Автомат. сварка. — 2001. — № 7. — С. 37–43.
2. Савицкий М. М., Кушниренко В. Н., Олейник О. И. Особенности сварки сталей вольфрамовым электродом с активными флюсами (А-ТИГ-процесс) // Там же. — 1999. — № 12. — С. 20–26.
3. Lucas W., Howse D. Activating flux — increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes // Weld. and Metal Fabr. — 1996. — № 1. — P. 11–15.
4. Lucas W. Activating flux — improving the performance of the TIG process // Ibid. — 2000. — № 2. — P. 7–10.
5. Surface active element effects on the shape of GTA, laser and electron beam welds / C. R. Heiple, J. R. Roper, R. T. Stagner, R. J. Aden // Welding J. — 1983. — 62, № 3. — P. 72–77.
6. Effects of activating flux on arc phenomena in GTAW / M. Tanaka, T. Shimizu, H. Terasaki et al. // Sci. and Techn. of Weld. and Joining. — 2000. — 5, № 6. — P. 397–402.
7. Влияние активирующих флюсов на проплавляющую способность сварочной дуги и концентрацию энергии в анодном пятне / О. Е. Островский, В. Н. Крюковский, Б. Б. Бук и др. // Свароч. пр-во. — 1977. — № 3. — С. 3–4.
8. Замков В. Н., Прилуцкий В. П. Теория и практика ТIG-F сварки (А-ТИГ) (Обзор) // Автомат. сварка. — 2004. — № 9. — С. 12–15.
9. Патон Б. Е., Замков В. Н., Прилуцкий В. П. Контракция дуги флюсом при сварке вольфрамовым электродом // Там же. — 2000. — № 1. — С. 1–8.
10. A-TIG — increasing the performance and productivity of the TIG process / W. Lucas, D. Howse, M. M. Savitsky, I. V. Kovalenko. — S. 1., [1996]. — 17 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1448–96).
11. Lowke J., Tanaka M., Ushio M. Insulation effects of flux layer in producing greater weld depth. — S. 1., [2004]. — 7 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. 212-1053–04).
12. Yushchenko K. A., Kovalenko D. V., Kovalenko I. V. Comparative analysis of TIG and A-TIG welding of stainless steel. — S. 1., [2005]. — 9 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. 212-1088–05).
13. Лесков Г. И., Трунов Е. Н., Живага Л. И. Форма, размеры и устойчивость пародинамических каналов в металле при электроннолучевой сварке // Автомат. сварка. — 1976. — № 6. — С. 13–17.
14. Воздействие лазерного излучения на материалы / Р. В. Арутюнян, В. Ю. Баранов, Л. А. Большов и др. — М.: Наука, 1989. — 367 с.
15. Formation of quasi keyhole is a cause of deep penetration in A-TIG welding of stainless steel / K. A. Yushchenko, D. V. Kovalenko, I. V. Krivtsun et al. — S. 1., [2005]. — 17 p. (Intern. Inst. of Welding; Doc. 212-1085–05).
16. Yushchenko K. A., Kovalenko D. V., Kovalenko I. V. Investigation of peculiarities of A-TIG welding of stainless steels. — S. 1., [2003]. — 18 p. (Intern. Inst. of Welding; Doc. 212-1047–03).

Given are the results of experimental studies of dimensions and shape of the weld pool surface in TIG and A-TIG welding of stainless steel 304N using the surface arc with incomplete penetration. It is hypothesized that one of the causes of deep penetration in A-TIG welding is formation of a keyhole and associated change in the Marangoni convection intensity. Configurations of the free surface and bottom of the weld pool, characteristic of A-TIG welding, prove this mechanism of deep penetration.

Поступила в редакцию 04.11.2005,  
в окончательном варианте 17.04.2006