



2. *Ерохин А. А.* Основы сварки плавлением. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
3. *Лесков Г. И.* Электрическая сварочная дуга. — М.: Машгиз, 1970. — 335 с.
4. *Исследование* процесса плавления флюса дугой / С. В. Гулаков, Б. И. Носовский, И. В. Тарасенко, И. С. Псарева // Автомат. сварка. — 2001. — № 8. — С. 25–27.
5. *Гулаков С. В., Носовский Б. И.* Особенности формирования сварочной ванны // Там же. — 1981. — № 11. — С. 32–35.
6. *Гулаков С. В., Носовский Б. И.* Влияние переноса тепла потоком жидкого металла на форму сварочной ванны // Свароч. пр-во. — 1982. — № 10. — С. 2–3.
7. *Гулаков С. В., Носовский Б. И.* О передаче тепла от источника к фронту плавления через жидкий металл сварочной ванны // Там же. — 1982. — № 6. — С. 5–6.
8. *О границе* раздела фронтов плавления и затвердевания в сварочной ванне / С. В. Гулаков, Б. И. Носовский, И. С. Кулябина и др. // Вестн. Приазов. гос. техн. ун-та: Сб. науч. тр. — Мариуполь, 1998. — Вып. № 6. — С. 246–247.
9. *Чернышов Г. Г., Маркушевич И. С., Николаенко М. Р.* Влияние потоков металла в сварочной ванне на образование дефектов формы шва при сварке под флюсом // Свароч. пр-во. — 1987. — № 10. — С. 41–42.
10. *Размышляев А. Д., Лецинский Л. К., Нестеренко К. А.* Распределение толщины прослойки жидкого металла по длине кратера сварочной ванны // Автомат. сварка. — 1975. — № 12. — С. 62–63.
11. *Гулаков С. В., Носовский Б. И.* Устройство для удаления жидкого металла из сварочной ванны // Там же. — 1980. — № 10. — С. 75.
12. *Райчук Ю. И.* Распределение тока по пластине при дуговой сварке // Там же. — 1967. — № 4. — С. 19–22.
13. *Гребельник П. Г.* Рентгеноисследование процесса автоматической сварки под флюсом // Там же. — 1950. — № 6. — С. 18–29.

Analysis of statistical and dynamic models of the weld pool was conducted. It revealed discrepancies and drawbacks of these models. Calculated and experimental data are given, allowing estimation of conditions of formation of the weld pool in MIG welding.

Поступила в редакцию 28.06.2001

Ответ Г. И. Лескова, С. В. Пустовойта

В приведенной статье повторно излагаются представления авторов о сварочной ванне при сварке с глубоким (10... 13 мм) проплавлением, опубликованные в журнале «Свароч. пр-во» № 6 за 1982 г.

На рис. 4 авторы изображают ее примыкающей по всей глубине к передней стенке, которая в процессе сварки, по их мнению, плавится, «растворяется и размывается» жидким металлом, нагреваемым дугой в верхней ее части.

Подобная ситуация, несложная для визуального наблюдения, фотографирования и рентгенопросвечивания не наблюдалась ни одним исследователем. Авторы ее также вряд ли видели. Приведенная ими фотография поверхности ванны (рис. 1) получена после погасания поверхностной дуги, когда заметен даже неглубокий кратер.

В действительности, как показали многочисленные эксперименты [1–3], при погруженной дуге жидкая ванна оттесняется к застывающему концу, активное пятно и столб дуги полностью или частично погружаются в кратер и более эффективно оплавляют дно ванны и ее переднюю кромку. Эти важные особенности сварочной ванны приведены во всех монографиях и учебниках по дуговой сварке.

Однако природа сил, вызывающих появление кратера и вытеснение жидкого металла в заднюю часть ванны, до настоящего времени дискуссионна. Существуют разногласия и о форме энергии, плавающей переднюю стенку кратера — излучением столба дуги или тепловым потоком, окружающим активное пятно дуги. Не рассмотрены физические явления, вызывающие движение расплавленного металла от передней стенки кратера в зону более высокого давления в его нижней части, и равновесие ванны в динамическом режиме.

В нашей статье [4] предпринята попытка анализа этих явлений. При этом мы опирались на экспериментальные данные различных исследова-

телей и фундаментальные законы физики, в том числе гидро- и газодинамики.

Предлагая свою «модель» ванны, авторы предельно проанализировали исходные положения и методы этого анализа. Критические замечания всегда полезны для совершенствования представлений о слабо изученных явлениях, поэтому мы рассмотрим их подробно.

1. Сечение плавящейся передней стенки кратера плоскостью симметрии ванны, наблюдаемое при сварке с глубоким проплавлением, считается неверным. Нами оно принято по результатам наблюдения этой стенки многими исследователями после удара ванны.

2. Ошибочными считаются заложенные в анализ данные о толщине жидкой прослойки на передней стенке и дне кратера, взятые нами из экспериментальной работы [5]. Для их опровержения авторы статьи поставили собственный эксперимент, продержав танталовый индикатор ($T_{пл} = 2996^\circ\text{C}$) в жидкой стали 3 и 6с, чтобы обнаружить его растворение, не учтенное в работе [5].

Полученный результат совпадает с данными [5] и принят в нашем анализе. Растворение индикатора не обнаружено. Его высота осталась неизменной.

3. Опыт авторов с заполнением выплеснутой ванны пластилином, якобы показывающий отсутствие в ней «каверны» и подтверждающий их «модель», не вызывает доверия. Кратер и газовая полость между электродом и его передней стенкой всегда существуют, и технологией сварки предусматривается его заварка в конце шва. Свои сомнения о ценности рентгеновских снимков при определении положения дуги авторы, надеемся, снимут после рассмотрения их в работе [1]. Главная ценность этих снимков — доказательство существования кратера при сварке под флюсом, а также отторжение любых «моделей», отрицающих этот факт.



4. Предложенная нами методика и результаты расчетов распределения мощности дуги по передней стенке кратера, опирающаяся на экспериментальные данные о равенстве скоростей плавления всех элементов передней стенки кратера, по мнению авторов, «перечеркивают все дальнейшие рассуждения об адекватности предлагаемой модели».

Нами показано, что постоянство указанных скоростей будет обеспечено, если время Δt пребывания блуждающего пятна дуги на элементах ds передней стенки пропорционально $\sin \alpha = ds/df$. Элементарные части ds и df передней стенки в нижних и верхних ее частях четко обозначены на рис. 2. Внимательный читатель увидит, что в нижней части кратера $df \gg ds$, поэтому $\sin \alpha$ и Δt близки к нулю. В верхней же части $df \cong ds$, поэтому значение $\sin \alpha$ и Δt максимальны. На этой основе и сделан вывод о различном времени пребывания активного пятна дуги в зонах передней стенки — максимальном в верхней и минимальном в нижней. «Перечеркивать» этот вывод не следует.

5. Оценка сил и давлений, действующих на расплавляемый металл передней стенки кратера и смещающих его вниз, произведен на основе экспериментальных данных о том, что протекает 70 % тока дуги на эту стенку и уравнений Ампера и Био-Савари. Их интегрирование, применение в расчетах напряженности магнитного поля и электромагнитных сил общеизвестны. Поэтому мы не считали необходимым объяснять, что dl — элемент проводника с током, r — радиус-вектор, β — угол между радиусом-вектором и направлением тока и т. д. В статье указаны принятые нами пределы интегрирования уравнения Био-Савари. Поэтому замечания авторов «что за линия r , в какой области располагается ее окончание, ...» в научном журнале неуместны.

6. Оценка глубины кратера произведена, опираясь на второй закон Ньютона, молекулярно-кинетическую теорию газов и экспериментальные данные о скорости плазмы в столбе конусной дуги 100... 500 м/с. Приняв ее значение 330 м/с, среднюю температуру $5 \cdot 10^3$ К, радиус корня шва 3 мм и глубину 1 см, изменение направления движения плазмы в кратере на $\pi/4$ с помощью расчета найдена сила, действующая на дно кратера, достаточная для его углубления на указанную величину.

Свои сомнения о возможности данного явления авторы могут проверить, подув на воду через трубочку. Углубление вызывается изменением количества движения любой струи, а не плотностью жидкости и плазмы. Условия динамического равновесия ванны и ее частей проанализированы на основе закона о движении идеальной жидкости и уравнения Бернулли.

Таким образом, модель сварочной ванны, предложенная С. В. Гулаковым и Б. И. Носовским, не имеет экспериментального подтверждения. Критические замечания в адрес опубликованной динамической модели несущественны, хотя она представляет лишь первую попытку ее построения. Для развития этой модели необходимо расширение и обобщение экспериментов.

1. Автоматическая сварка под флюсом. — К.; М.: Машгиз, 1948. — 344 с.
2. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз. — 1951. — 296 с.
3. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машгиз, 1974. — 768 с.
4. Лесков Г. И., Пустовойт С. В. К вопросу построения динамической модели сварочной ванны при электродуговой сварке // Автомат. сварка. — 2001. — С. 11–15.
5. *Распределение* толщины прослойки жидкого металла по длине кратера сварочной ванны / А. Д. Размышляев, Л. К. Лецинский и др. // Там же. — 1975. — № 12. — С. 62–63.