



Наши представления о распределении тепловых источников, теплообмене и о гидродинамических явлениях в сварочной ванне пока еще очень слабо развиты. В этом отношении опубликованная ранее в нашем журнале статья Г. И. Лескова и С. В. Пустовойта «К вопросу построения динамической модели сварочной ванны при электродуговой сварке» («Автоматическая сварка», 2001 г., № 1, с. 11–15) представляет собой шаг вперед. Некоторые положения, принятые в статье, оспариваются С. В. Гулаковым и Б. И. Носовским, авторами ниже публикуемой статьи.

Учитывая сложность проблемы и важность правильного понимания физических явлений, происходящих в ванне, редколлегия решила публикацию статьи С. В. Гулакова и Б. И. Носовского сопроводить ответом на нее Г. И. Лескова и С. В. Пустовойта. Редколлегия не намерена далее продолжать на страницах журнала дискуссию между упомянутыми авторами до получения и изучения новых сведений, необходимых для построения физической модели сварочной ванны.

Одновременно надеемся, что опубликованные статьи привлекут внимание исследователей к этой сложной и важной проблеме.

От редколлегии

УДК 621.791.75

## К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

С. В. ГУЛАКОВ, д-р техн. наук, Б. И. НОСОВСКИЙ, канд. техн. наук (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Проведен анализ статической и динамической моделей сварочной ванны, выявивший их противоречия и недостатки. Приведены расчетные и экспериментальные данные, позволившие оценить условия формирования сварочной ванны при дуговой сварке плавящимся электродом.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, сварочная ванна, жидкая прослойка, потоки жидкого металла

Построение моделей формирования сварочной ванны в настоящее время является весьма актуальной проблемой. Использование таких моделей в исследовательской и практической деятельности позволяет детально изучать процессы образования качественных сварных соединений, прогнозировать их параметры и управлять ими. Однако для получения достоверных результатов необходимо тщательно проверять корректность этих моделей.

В этой связи, исходя из результатов работы [1], считаем необходимым высказать свое мнение по поводу рассматриваемого вопроса.

В первую очередь проанализируем известную квазистатическую осесимметричную модель сварочной ванны. В основу ее построения положены предположения о том, что тепло от источника энергии передается в глубь металла благодаря его теплопроводности, граница раздела поверхности плавления и затвердевания — прямая линия, которая совпадает с плоскостью, проходящей через ось электрода и максимумы глубины и ширины сварочной ванны [2].

Вызывает сомнение достоверность предположения о пространственной устойчивости жидкого металла ванны, схема которой приведена на рис. 1, а условие устойчивости описано равенством (2) в работе [1]. Последнее может быть верным при наличии в передней части сварочной ванны трех стенок, удерживающих жидкий металл растекания. В реальных условиях без этого жидкий металл не поднимется на высоту  $h + h_{\text{в}}$ , вычисленную

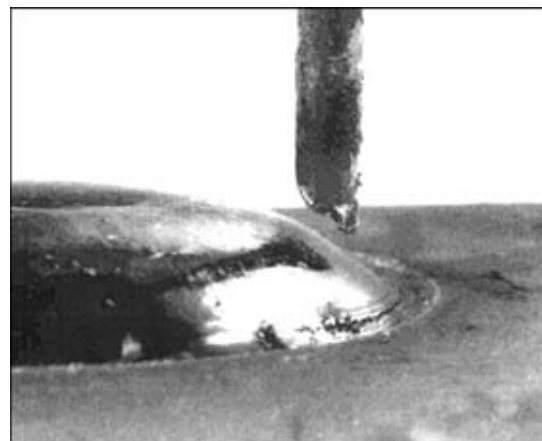


Рис. 1. Расположение торца электрода относительно сварочной ванны



из указанного равенства, а будет растекаться за дугой. Такую стенку, подпирающую жидкий металл, может создать плазменный поток дуги, отраженный от дна ванны. Но в этом случае в упомянутое выражение следует внести коррективы, поскольку энергия плазменного потока будет затрачиваться не только на то, чтобы вытеснить и поднять жидкий металл в хвостовую часть кратера, но и чтобы его удержать вблизи задней стенки затвердевающего металла. Кроме того, как отмечено в работе [1], этот поток должен направить жидкий металл не только в хвостовую часть кратера сварочной ванны, но и в другие стороны, в том числе вперед дуги.

При сварке плавящимся электродом в сварочную ванну, кроме плазменного потока, поступает поток жидкого электродного металла. В рассматриваемой схеме не учтена работа этого потока в формировании кратера ванны в зоне горения дуги (плотность потока по данным, приведенным в обсуждаемой работе, на пять порядков выше, чем в плазме дуги).

Возникают также проблемы, связанные с расплавлением передней стенки кратера излучением столба дуги. По данным работы [3], энергия, выделяемая в столбе дуги, составляет при сварке под слоем плавного флюса всего 15...20 % общего количества энергии, выделяемой в дуге. Эффективность светового излучения в нагреве окружающей среды невелика. Поэтому обеспечить интенсивный разогрев передней стенки кратера и ее расплавление со скоростью сварки маловероятно. Подтверждением этому являются данные работы [4], свидетельствующие о том, что в непосредственной близости от столба дуги под действием ее излучения не плавится даже флюс.

Относительно свойств слоя жидкого металла под дугой, являющегося якобы теплоизолятором, можно отметить следующее: жидкий металл подвижен и способен при перемещении транспортировать тепло из одной области в другую со скоростью, во много раз превосходящей скорость передачи тепла благодаря теплопроводности. Для оценки эффективности теплопереноса в сварочной ванне с помощью теплопроводности и потоков жидкого металла следует сравнить размеры и форму реальной сварочной ванны [5, 6] с ванной, параметры которой рассчитаны по теории теплопроводности.

Изложенные факты не позволяют считать квазистатическую модель сварочной ванны корректной и применимой для анализа процессов формирования сварных швов.

Автор работы [1], приняв за основу результаты исследований, проведенных другими авторами, сделали попытку на базе объема информации с помощью теории теплопроводности построить динамическую модель сварочной ванны. Причем последующая проверка этой модели с помощью практических экспериментов проведена не была (во всяком случае, информация об этом в статье отсутствует).

Что касается сути проблемы, то, вероятно, следует остановиться на вопросах, которые являются

основными для построения динамической модели сварочной ванны: процессы плавления передней стенки кратера и силы, вызывающие движение жидкого металла по ней; наличие жидкой прослойки в сварочной ванне под дугой, ее форма и размеры; расположение оси электрода относительно формирующейся сварочной ванны; геометрическая форма сварочной ванны при дуговой сварке плавящимся электродом; характер оплавления торца электрода при дуговой сварке; размеры и положение столба дуги, горящей под слоем флюса.

В работе [7] приведены данные, произведены расчеты, показывающие, что ось электрода не располагается над максимумом глубины проплавления сварочной ванны, а находится в непосредственной близости от ее передней кромки (рис. 1). Указанный эффект можно наблюдать и на рис. 3 из работы [1]. Существенным фактором является то, что в большинстве случаев максимумы ширины сварочной ванны и ее глубины не совпадают (не находятся в одной плоскости) [5], а форма границы, отделяющей зону плавления от области затвердевания, отличается от прямой линии и в основном бывает либо выпуклой, либо вогнутой [8, 9]. А если учесть, что глубина ванны часто не бывает равна половине ее ширины (см., например, рис. 1 из [5]), то утверждение авторов работы [1], о том, что «...сечение последней плоскостью симметрии, формируемой осью движущегося электрода, представляет собой кривую с примерно одинаковым радиусом кривизны  $R_c$  с центром на торце проволочного электрода ...», является неверным.

Авторы работ [10 и др.], определявшие экспериментально толщину жидкой прослойки, допускали, что высокотемпературная танталовая вставка плавится только дугой, а не жидким металлом. В действительности при дуговой сварке под слоем флюса танталовая и даже вольфрамовая вставки растворяются в жидком металле сварочной ванны. Вследствие этого измеренная указанным в работе [10] способом толщина жидкой прослойки оказалась значительно меньше реальной [7]. В работе [7] также рассчитаны размеры длины столба дуги с использованием данных [3] о распределении энергии в сварочной дуге. В соответствии с ними длина дуги, горящей под слоем плавного флюса при параметрах режима, приведенных в статье, составляет около 2 мм. Как следует из работы

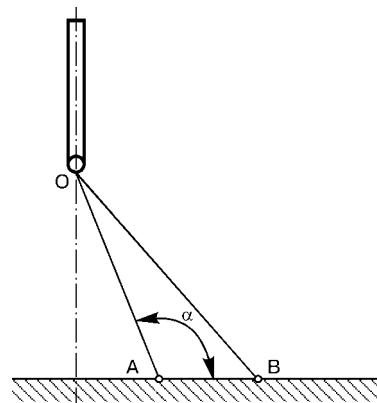


Рис. 2. Схема расчета положения дуги (объяснения см. в тексте)



[1], расстояние  $R_c$  (см. рис. 2) должно быть на порядок больше. В противном случае приведенная схема некорректна.

Для оценки формы и размеров каверны (газовой полости, образованной силовым действием дуги) в жидком металле ванны под дугой был проведен следующий эксперимент. В процессе наплавки валика на пластину на режимах, указанных в работе [7], осуществляли выплеск металла ванны по методике, описанной в [11], и определяли объем выплеснутого металла путем взвешивания материалов, участвовавших в наплавке, до эксперимента и после выплеска. Затем, взяв пластилин в объеме, равном объему выплеснутого металла, поместили его в полость сварочной ванны, образовавшуюся после выплеска жидкого металла. Однако объем пластилина был настолько большим, что получить каверну формы и размера, указанных в работах [1, 10], обеспечив при этом образование тонкой прослойки в области максимальной глубины проплавления, не удалось. В этой связи предложена модель заполнения сварочной ванны жидким металлом, приведенная на рис. 1 в работе [7].

Поскольку электрод в процессе дуговой сварки находится практически у передней кромки сварочной ванны, то распределение тока будет соответствовать данным работы [12]. Как утверждают авторы работы [1], пространственное положение дуги, горящей под слоем флюса с вертикального или расположенного под углом электрода, вряд ли можно определить с помощью рентгеновской съемки. По контрастности или плотности изображения плазма дуги и газ околодугового пространства не отличаются и на рентгеновском снимке не различимы.

Характер оплавления торца электрода со скосом его передней части, который принят для построения динамической модели, также вызывает сомнение. Примером тому являются рентгеновские снимки, приведенные в работе [13], где скос торца электрода имеет противоположное направление.

Авторами работы [1] предложена методика расчета распределения мощности в дуге в кратере по форме его передней стенки и на рис. 4 приведена расчетная схема. Из этого рисунка и выражения (4) совсем не следует, что дуга не может гореть вертикально. В соответствии с указанным рисунком угол наклона дуги к свариваемой поверхности  $\alpha$  будет минимальным при горизонтальном положении дуги (дуга горит на переднюю кромку), а не при ее вертикальном, как утверждают авторы [1]. Это полностью перечеркивает все дальнейшие



Рис. 3. Характер оплавления торца электрода

рассуждения об адекватности предлагаемой модели. По рис. 2 возникают вопросы: что за линия  $r$ , исходящая из точки  $A$ , изображена на нем? Почему именно относительно нее измеряется угол  $\alpha$ ? В какой области электрода располагается ее окончание и почему?

Для определения пространственного положения дуги нами предложена следующая методика. В соответствии с ней осуществляется дискретное смещение электрода на регламентированное расстояние  $c$ , измеряется амплитуда приращения напряжения на дуге  $\Delta U_d$  в момент смещения и напряжение на дуге  $U_d$  перед смещением и последующей математической обработке результатов измерения. Суть методики иллюстрирует рис. 2, где отрезками  $0A$  и  $0B$  условно показаны соответственно оси симметрии столба дуги до смещения электрода относительно изделия и в первый момент после смещения. Зная длину дуги до и после смещения (на схеме показано смещение изделия относительно электрода на расстояние  $AB = c$ ), а также это смещение  $c$ , можно по трем сторонам треугольника  $A0B$  определить угол наклона дуги к свариваемой поверхности  $\alpha$ .

Длину дуги до и после смещения можно найти из следующих выражений:

$$L_{d(0A)} = \frac{U_d - (U_a + U_k)}{E_d}; \quad (1)$$

$$L_{d(0B)} = \frac{U_d + \Delta U_d - (U_a + U_k)}{E_d}, \quad (2)$$

где  $U_d$  — напряжение на дуге, В;  $U_a$ ,  $U_k$  — приэлектродные падения на дуге соответственно на аноде и катоде, В;  $\Delta U_d$  — приращение напряжения на дуге при смещении электрода или изделия на расстоянии  $c$ ;  $E_d$  — градиент падения напряжения в столбе дуги (приведен в литературных источниках, например [3], В/мм).

Тогда

$$\alpha = \arccos \frac{[U_d - (U_a + U_k)]^2 + E_d^2 c^2 - [U_d + \Delta U_d - (U_a + U_k)]}{2c E_d [U_d - (U_a + U_k)]}. \quad (3)$$

Учитывая, что  $U_d - (U_a + U_k) = U_c$  (здесь  $U_c$  — падение напряжения на столбе дуги), уравнение (3) можно упростить

$$\alpha = \arccos \frac{U_c^2 - (U_c - \Delta U_d)^2 + E_d^2 c^2}{2c U_c E_d}. \quad (4)$$

Приращение напряжения на дуге в момент дискретного смещения электрода относительно изделия определяли с помощью электронно-лучевого осциллографа: на его входе включали дифференцирующее звено, выделяющее только переменную составляющую напряжения на дуге — амплитуду приращения этого напряжения.

Измерения показали, что в исследованном диапазоне значений параметров режима сварки ( $U_d = 27 \dots 40$  В;  $I_d = 400 \dots 800$  А;  $v_{св} = 0,3 \dots 1,5$  см/с) и при угле наклона электрода к наплавляемой поверхности от  $30$  до  $90^\circ$  дуга практически не отклонялась от нормали к этой поверхности. Под-



тверждением этому является характер оплавления торца электрода (рис. 3), которое происходило параллельно этой поверхности при изменении угла наклона оси электрода.

Из результатов проведенных авторами исследований и указанных выше материалов следует, что природа формирования передней стенки кратера сварочной ванны отличается от описанных ранее как статической, так и представленной в статье [1] динамической модели.

Если форму сварочной ванны, распределение в ней жидкого металла и ориентацию электрода относительно нее представить в виде схемы, приведенной на рис. 4, то процесс формирования ванны может происходить следующим образом.

Элементарный объем металла  $dV$  за время  $dt$ , получая запас кинетической энергии, а также энергии в виде переданного объема металла тепла, начинает двигаться в потоке жидкого металла со скоростью  $v$  вдоль передней стенки кратера, совершая работу по ее расплавлению и преодолению сопротивления среды. При этом перемещение передней стенки ванны в направлении вектора скорости сварки (переход ее из твердого состояния в жидкое) происходит не только за счет ее плавления, но и за счет растворения [7] и размыва. По мере расхода запаса энергии интенсивность расплавления передней стенки уменьшается, и в нижней точке ванны (по ее оси) начинается процесс затвердевания металла ванны и формирование шва.

Таким образом, введенная в головную часть сварочной ванны энергия будет транспортироваться в ту сторону, куда направлены потоки жидкого металла, формируемые внешними силами. Энергию, выделяемую в дуге и передаваемую основному металлу, можно считать сконцентрированной в активном пятне дуги (катоде при обратной полярности), расположенном в головной части сварочной ванны на ее поверхности вблизи передней кромки. Затем эта энергия (в основном потенциальная, тепловая и кинетическая — в виде скоростного потока среды) транспортируется в различные точки объема ванны преимущественно потоками жидкого металла. В формировании последних активное участие, кроме электромагнитных и других сил, действующих непосредственно на жидкий металл ванны, принимают потоки плазменной дуги и жидкого электродного металла (в виде капель при капельном переносе или струи — при струйном). Направление потоков и их характер в процессе формирования сварочной ванны в процессе дуговой сварки описаны в работе [6]. Эти данные свидетельствуют об участии в возникновении и интенсификации потоков в сварочной ванне металла плавящегося электрода, который движется под действием сил тяжести кинетической энергии перемещающегося электрода, электромагнитных и других сил.

В поле гравитации струя или капля металла, оторвавшаяся от электрода, будет двигаться с ускорением в дуговом промежутке и к моменту входа в ванну приобретет определенную скорость:

$$v = v_0 + \sqrt{2gh} + \frac{1}{m} \int F(t) dt, \quad (5)$$

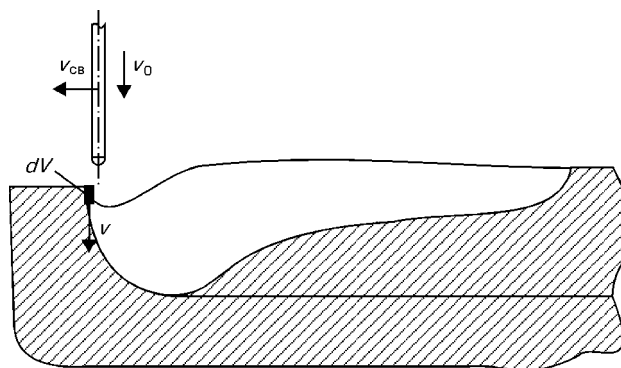


Рис. 4. Форма сварочной ванны в продольном сечении (см. объяснения в тексте)

где  $v_0$  — скорость подачи электрода;  $g$  — ускорение в поле гравитации;  $h$  — длина дуги;  $m$  — масса капли;  $F(t)$  — закон распределения электромагнитных, газодинамических и других сил вдоль дуги, действующих на каплю или струю электродного металла;  $t$  — текущее время полета капли в дуговом промежутке.

Необходимо отметить, что при равных сварочных токах скорость подачи электрода возрастает с уменьшением его диаметра. Следовательно, будет увеличиваться и начальная скорость капли или струи электродного металла в сварочной ванне.

В то же время известно, что уменьшение диаметра электрода при постоянном значении тока вызывает увеличение глубины проплавления [7].

Диаметр электрода в свою очередь оказывает существенное влияние на характер переноса электродного металла в ванну, определяющего условия его взаимодействия с поверхностью ванны, а следовательно, и его роль в формировании потоков в ней.

При крупнокапельном переносе капля, имеющая большую площадь соприкосновения с поверхностью ванны, должна преодолеть силы поверхностного натяжения. При этом происходит потеря ее кинетической энергии на образование поверхностных колебаний. В случае струйного переноса электродного металла поверхность контакта струи с ванной незначительна. При этом плавящийся металл электрода свободно проникает (вливается) в глубь ванны, создавая в ней поток, который движется с большой скоростью, обеспечивая интенсивный перенос тепла ко дну ванны и увеличивая ее глубину.

Плазменный поток дуги, воздействуя на поверхность сварочной ванны, не может проникнуть (в большинстве случаев при качественном формировании сварного шва) в ее глубину из-за малой плотности плазмы по отношению к плотности жидкого металла. Он растекается по поверхности ванны, деформируя ее и создавая в ней поверхностные потоки. Соотношение интенсивностей этих потоков (осевого глубинного и поверхностного) определяет условия тепло- и массопереноса в сварочной ванне, и соответственно влияет на основные геометрические параметры и качество формирования сварного соединения.

1. Лесков Г. И., Пустовойт С. В. К вопросу построения динамической модели сварочной ванны при электродуговой сварке // Автомат. сварка. — 2001. — № 1. — С. 11–15.



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 отгесняется 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 не верным. 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.