

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.791.754

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА В СВАРОЧНОЙ ВАННЕ

© 2017 В.Ф. Кубарев

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Выполнена оценка массопереноса на фронте плавления сварочной ванны при сварке неплавящимся электродом стыковых соединений низколегированных сталей толщиной 4-10 мм.

Одной из главных проблем формирования шва при сварке плавящимся электродом на высоких скоростях является проблема возникновения подрезов на лицевой поверхности шва. Возникла необходимость смоделировать процесс массопереноса из головной в хвостовую часть сварочной ванны с учетом всех основных сил, влияющих на перемещение металла.

Оценка проводилась с использованием плоской модели ванны. Процесс плавления имитировался вдвум массы металла через фронт плавления в системе координат, связанной с дугой. Оценка значимых сил выполнена с помощью критериев подобия.

Выяснено, что основными силами являются: силы тяжести, электродинамические силы, давление дуги на поверхность расплавленного металла.

Предлагаемая модель ванны принципиально отличается от существующих моделей (переменность расхода расплава по длине фронта, распределенность сил по поверхности и объему расплава, возможность расчета изменения скорости расплава по длине фронта плавления).

Ключевые слова: сварочная ванна, расход металла, плотность электродинамических сил, расплав, давление дуги, скорость движения металла.

Поступила в редакцию: 10.05.2017

Сварочная ванна является сложным гидродинамическим объектом. Перед построением модели ванны надо сделать оценку критериев подобия, оценить конечный эффект взаимодействия и их влияние на процессе массопереноса в ванне. За характерный размер при оценке критериев подобия в ванне принимали толщину слоя жидкого металла под дугой на фронте плавления.

Все физические постоянные относили к средней температуре между температурой плавления и кипения стали.

Движение металла в ванне должно строго описываться системой уравнений магнитной гидродинамики.

По параметру Бэтчелора $\beta = \frac{Re_m}{Re} \ll 1$, где Re_m – магнитное число Рейнольдса, Re – обычное число Рейнольдса, распределение электродинамических сил в ванне можно определять в безиндукционном приближении.

Приведём уравнение Навье-Стокса (1) к безразмерному виду.

В качестве основы для построения системы критериев используем электродинамические силы в сварочной ванне.

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla P + \mu \Delta \vec{v} + [\vec{j}, \vec{B}] + \rho \vec{g} \quad (1)$$

где ρ – плотность металла,
 \vec{v} – скорость течения металла,
 P – давление,
 μ – вязкость расплава,
 \vec{j} – плотность тока,
 \vec{B} – индукция собственного магнитного поля в ванне,
 \vec{g} – ускорения силы тяжести.

В относительных переменных:

$$\bar{B} = \frac{B}{B_0}; \bar{P} = \frac{P}{P_0}; \bar{v} = \frac{v}{v_0}; \bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_0}; \bar{x} = \frac{x}{l_0}; \bar{y} = \frac{y}{y_0}; \bar{z} = \frac{z}{z_0},$$

где индексом "0" обозначены характеристические значения величин, уравнение (1) примет вид (2):

$$\Pi_1 \left[\frac{1}{Sh} \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right] = (1 + \Pi_5) \left\{ -\Pi_2 \nabla P + \Pi_3 \Delta \vec{v} + [\vec{v} \nabla \vec{B}] \vec{B} \right\} + \Pi_4 \quad (2)$$

$\Pi_1 = \frac{\rho v_0^2 \mu_0}{B_0^2}$ – характеризуем отношение сил инерции к электродинамическим силам,

$\Pi_2 = \frac{P_0 \mu_0}{B_0^2}$ – характеризуем отношение давления в расплаве к электродинамическим силам,

$\Pi_3 = \frac{\eta v_0 \mu_0}{l_0 B_0^2}$ – характеризуем отношение вязкого трения к электродинамическим силам,

$\Pi_4 = \frac{g \rho_0 \mu_0 l_0}{B_0^2}$ – характеризуем отношение сил тяжести к электродинамическим силам,

$\Pi_5 = \beta T$ – характеризуем роль сил тепловой конвекции,

$Sh = \frac{V_0 \tau_0}{l_0}$ – число Струхалия.

Оценка по этим критериям показывает, что основными для массопереноса в сварочной ванне являются силы тяжести, электродинамические силы Ампера, давление дуги на поверхность расплава.

Модель массопереноса в сварочной ванне предлагаемая авторами [2], [3] принципиально отличается от существующих моделей. При заданном режиме сварки поверхности фронтов плавления и кристаллизации неподвижны в системе отсчета, связанной с движущейся дугой. Поэтому сварочную ванну можно представить в этой системе координат в виде канала с пористыми стенками. Процесс плавления лимитируется вдувом через поверхность фронта плавления со скоростью сварки, а процесс кристаллизации отсосом расплава через поверхность фронта. Форма сварочной ванны определяется процессами теплообмена.

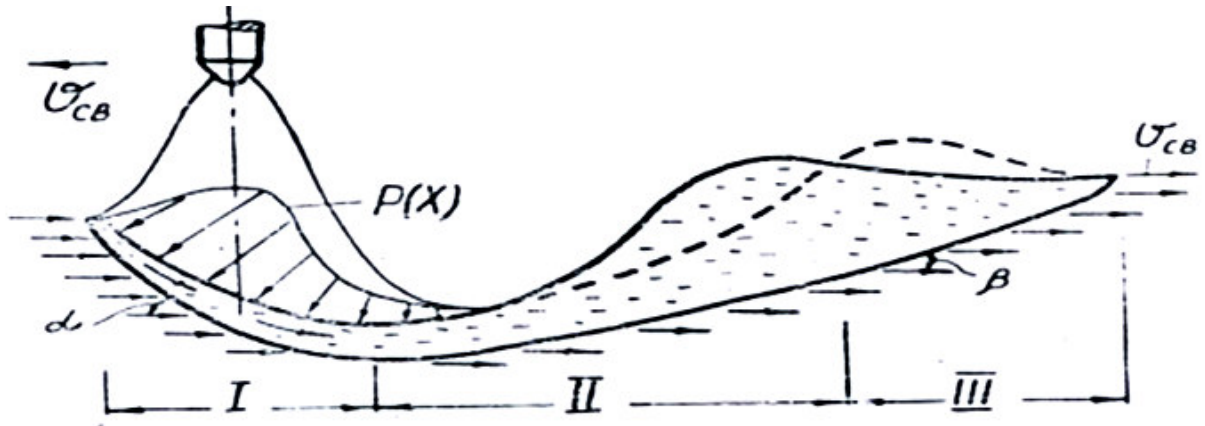


Рис. 1. – Гидродинамическая модель сварочной ванны

Скорости плавления и кристаллизации направлены по нормальям к изотермической поверхности ванны [4]. Это подтверждает возможность подобного моделирования в сварочной ванне. В трёхмерной постановке решить задачу массопереноса в ванне пока не удалось. Поэтому сделана упрощенная модель ванны в виде плоской модели, единичной ширины [3], рисунок 1.

Уравнения, описывающие движение расплава, представляют систему дифференциальных уравнений [3]

$$\frac{d(yv)}{dx} = v_{cb} \sin \alpha \quad (3)$$

$$\rho \frac{d(yv^2)}{dx} - \frac{1}{2} \rho v_{cb}^2 \sin 2\alpha = \rho g y \sin \alpha + f_{\partial\partial} y - y \frac{dP}{dx} - \frac{2\mu v}{y} \quad (4)$$

Уравнение (3) представляет изменение расхода $(1 \cdot yv) \frac{m^3}{c}$ по длине фронта плавления рисунок 2.

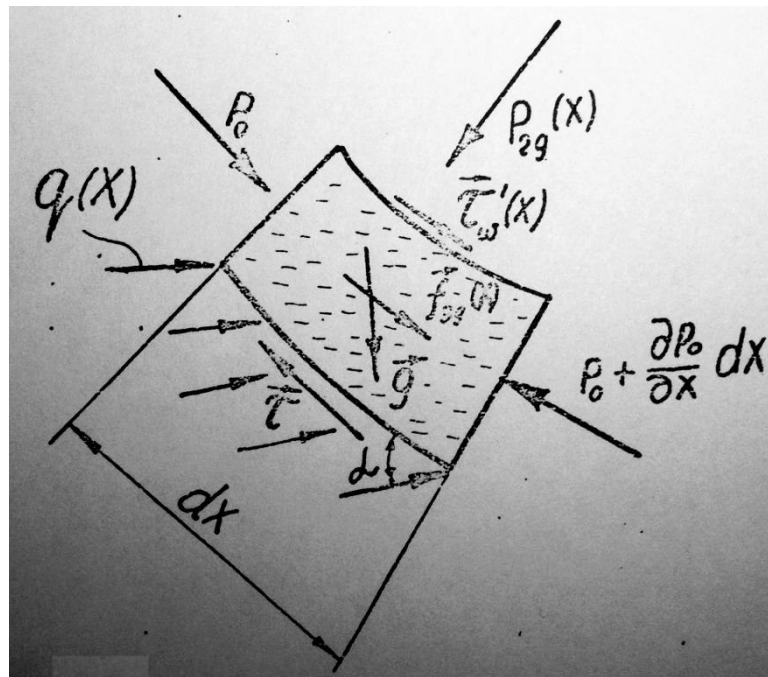


Рис. 2. – Элемент объема расплава на фронте плавления

y – толщина слоя расплава по нормали,

v – скорость течения расплава.

Уравнение (4) представляет изменение импульса элемента расплава вдоль фронта X . Для решения системы (3) (4) относительно $v(x)$, $y(x)$ необходимо знать $P(x)$, $\alpha(x)$, $f_{эд}(x)$.

Граничные условия задаются в виде (5):

$$x = x_0; y = y_0; v(x_0) = v_{св} \Delta(x_0) \quad (5)$$

При взаимодействии струи газа с наклонной плоскостью [5] максимальное давление пропорционально синусу угла φ атаки, а точка максимального давления смещается вверх от места геометрического пересечения оси струи с поверхностью преграды.

Будем полагать, что при воздействии дуги на поверхности это сохранится.

На поверхности расплава в передней части фронта $P(x)$ нарастает, а ниже оси дуги убывает.

Положение точки с максимальным давлением на фронте плавления должно влиять на скорость течения $v(x)$ и толщину слоя $y(x)$ расплава. Длины участков с нарастанием $P(x)$ или его убыванием зависят от режима сварки.

Распределение давления вдоль поверхности фронта плавления задавали по аналогии с [5] в виде

$$P(x) = P_{ш} \sin \varphi(x) \exp \left[- \left(\frac{3,46}{a_{ш}} \right)^2 (x - x_г) \right], \quad (6)$$

где $a_{ш}$ – ширина шва,

$x_г$ – координата нижней точки фронта.

Распределение плотности электродинамических сил $f_{эд}(x)$ вдоль оси ванны определяли из решения трёхмерной задачи краевой о распределении тока \vec{j} и магнитной индукции \vec{B} в объёме ванны [3]. Распределение $f_{эд}(x)$ задавали табличным способом.

Форма фронта плавления задается $\alpha(x)$ и на заданном режиме определяется из опытов. Система уравнений (3) (4) решалась численным методом Рунге-Кутты.

Для сварки в среде Ar, неплавящимся электродом $I=140A$; $v_{св}=15м/ч$; $U=10В$, получена зависимость $v(x)$ рисунок 3, которая показывает нарастание скорости вдоль фронта плавления. При входе в хвостовую часть ванны эта скорость максимальна.

ВЫВОДЫ:

1) Ванну можно представить в виде канала с пористыми стенками. Плавление и кристаллизация лимитируются вдувом и отсосом расплава через поверхность фронта кристаллизации.

2) При сварке неплавящимся электродом в среде аргона количественная оценка показывает возрастание скорости течения расплава вдоль фронта плавления.

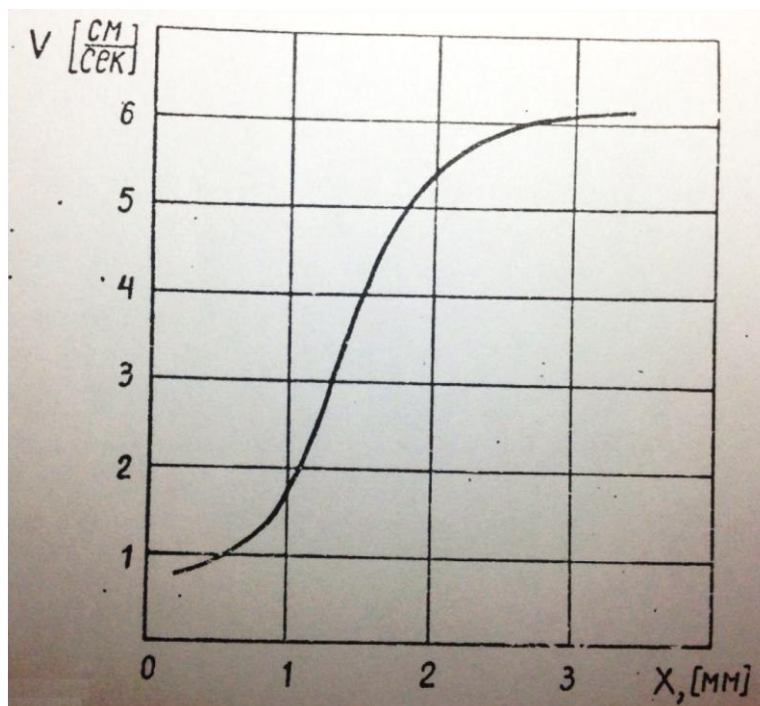


Рис. 3. – Изменение скорости течения расплава вдоль оси X

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика [Текст] / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – 699 с.
2. Кубарев, В.Ф. и др. Гидродинамические процессы в сварочной ванне [Текст] / В.Ф. Кубарев и др. // Известия вузов. Машиностроение. – 1979. – № 5. – С. 119–123.
3. Кубарев, В.Ф. Исследование физических процессов взаимодействия электрической сварочной дуги с металлом и оценка возможностей управления формообразованием шва. [Текст] / В.Ф. Кубарев : дисс. канд. техн. наук. – М., 1979. – 179 с.
4. Прохоров, Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке [Текст] / Н.Н. Прохоров. – М.: Metallurgiya, 1968. – 694 с.
5. Юдаев, Б.Н. и др. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами [Текст] / Б.Н. Юдаев, М.С. Михайлов, В.К. Савин. М.: Машиностроение, 1977 – 246 с.

REFERENCES

- [1] Levich V.G. Fiziko-khimicheskaja gidrodinamika [Physical and Chemical Hydrodynamics]. M. Pub. Fizmatgiz [Physmatgiz], 1959, 699 p. (in Russian)
- [2] Kubarev V.F. etc. Gidrodinamicheskie protsessy v svarochnoi vanne [Hydrodynamic Processes in the Welding Tub]. Izvestiia vuzov. Mashinostroenie [News of Higher Education Institutions. Mechanical Engineering], 1979, №5, ISSN 0536-1044, pp. 119–123. (in Russian)
- [3] Kubarev V.F. Issledovanie fizicheskikh protsessov vzaimodeistviia elektricheskoi svarochnoi dugi s metallom i otsenka vozmozhnostei upravleniia formoobrazovaniem shva [Research of Physical Processes of Electric Welding Arc Interaction with Metal and Management Opportunity Assessment of Seam Shaping]. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [PhD Thesis in Engineering]. M. 1979. 179 p. (in Russian)
- [4] Prokhorov N.N. Fizicheskie protsessy v metallakh pri svarke [Physical Processes in Metals when Welding]. M. Pub. Metallurgiya [Metallurgy], 1968. 694 p. (in Russian)
- [5] Iudaev B.N., Mikhailov M.S., Savin V.K. Teploobmen pri vzaimodeistvii strui s pregradami [Heat Exchange at Interaction of Streams with Barriers]. M. Pub. Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1977, 246 p. (in Russian)

Study of Mass Transfer in Welding Tub

V.F. Cubarew

*National Research University «MPEI»,
Krasnokazarmennaya St., 14, Moscow, Russia, 111250
e-mail: doronin-45@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8493-8933
WoS ResearcherID: J-5424-2017*

Abstract – The mass transfer at the melting front of the welding tub is evaluated when welding with butt joint non-consumable electrode of low-alloy steels 4-10 mm thick.

The problem of undercutting on the seam face is one of the main problems of weld formation when welding with a consumable electrode at high speeds. It became necessary to model the mass transfer process from the head to the tail part of the welding tub taking into account all the basic forces affecting the metal movement.

The evaluation was carried out using a flat tub model. The melting process was simulated by blowing the metal mass through the fusion front in the coordinate system connected with the arc. Evaluation of significant forces was made using similarity criteria.

It was found out that the main forces are gravity forces, electrodynamics forces, arc pressure on the molten metal surface.

The proposed model of the tub differs in principle from existing models (the variability of the melt flow along the length of the front, the distribution of forces over the surface and the volume of the melt, the possibility of calculating the change in the melt velocity along the length of the fusion front).

Keywords: welding tub, metal consumption, electrodynamics force density, melt, arc pressure, metal movement speed.