

- Technical University: collection of scientific works V. 6: Mariupol, 1998. – P. 201-204 (Rus.).
6. Leshchinskiy L.K. Multilayer compositions: surfacing and hardening / L.K. Leshchinskiy, S.S Samotugin. – Mariupol: Noviy mir, 2005. – 392 p. (Rus.).
 7. Leshchinskiy L.K. The shape of the weld pool in the process of surfacing using composite strip electrode / L.K. Leshchinskiy, V.N. Matvienko, S.V. Gulakov // Paton arc welding journal. – 1991. – № 11. – P. 58-60 (Rus.).

Рецензент: В.И. Щетинина
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 30.04.2013

УДК 621.791.92

Иванов В.П.*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКИ УПРАВЛЕНИЕМ ГИДРОДИНАМИКОЙ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ

Осуществлен обзор состояния дел в области моделирования зон проплавления и наплавки металла шва, исследований способов управления и стабилизации процесса формообразования сварочной ванны и возникающих при этом дефектов формирования. Разработаны динамические модели формирования сварочной ванны и связанных с этим дефектов наплавленного шва. На основе этих моделей проанализирована взаимосвязь таких информационных сигналов, как скорость подачи электрода и скорость перемещения струи–источника как параметров системы управления технологическим процессом наплавки.

Ключевые слова: сварочная ванна, гидродинамические процессы, формообразование, зона проплавления, скорость потока, математическая модель.

Иванов В.П. Підвищення ефективності процесу електродугового наплавлення керуванням гідродинаміки зварювальної ванни. Здійснено огляд стану справ в області моделювання зон проплавлення і наплавлення металу шва, досліджень способів управління і стабілізації процесу формоутворення зварювальної ванни і виникаючих при цьому дефектів формування.

Розроблено динамічні моделі формування зварювальної ванни і пов'язаних з цим дефектів наплавленого шва. На основі цих моделей проаналізовано взаємозв'язок таких інформаційних сигналів, як швидкість подачі електрода і швидкість переміщення струменя–джерела як параметрів системи управління технологічним процесом наплавлення.

Ключові слова: зварювальна ванна, гідродинамічні процеси, формоутворення, зона проплавлення, швидкість потоку, математична модель.

Ivanov V.P. Increasing of the efficiency of electric arc overlaying process with control the hydrodynamics of the weld pool. The review of the situation in the

* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь

field of modeling of penetration and surfacing areas of the weld meta was carried out, research ways to control and stabilize the process of forming the weld pool and emerging with defects of formation.

Developed was dynamic model of the formation of the weld pool and associated defects in the weld seam. Based on these models, analyzed the relationship of the information signals – the feed rate and speed of the jet–source as control system parameters of deposition process.

Keywords: *weld pool, hydrodynamic processes, formation, area of penetration, rate of flow, the mathematical model.*

Постановка проблеми. Процессы электродуговой наплавки, обладая рядом технологических преимуществ перед другими видами восстановления и создания рабочих слоев изделий, широко используются в ряде отраслей промышленности.

Однако достигнутый на сегодняшний день уровень знаний об этих технологических процессах явно недостаточен для дальнейшего расширения их сферы применения и повышения качества наплавленных изделий. Условия, диктуемые современным этапом развития производства, настоятельно требуют разработки теоретических основ процессов, происходящих в сварочной ванне, физически и математически адекватных моделей, средств автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами и оборудованием для наплавки.

Построение таких основ, моделей и средств возможно на базе глубокого и всестороннего теоретического анализа физических процессов при взаимодействии жидкого металла расплавляемого электрода с основным металлом. Поскольку физическая природа и особенности гидродинамических процессов идентичны для многих технологий, целесообразна разработка моделей формообразования сварочной ванны и наплавленного слоя на основе теории движения жидких сред.

Анализ последних исследований и публикаций. Для анализа современного состояния дел в области моделирования взаимодействия гидродинамических потоков при сварке необходимо определить теоретические основы гидродинамических явлений, происходящих, в том числе, и в сварочной ванне.

Основные теоретические аспекты течений идеальной и вязкой жидкости исследовались такими учеными как Д. Бернулли, Ж.Л. Даламбер, Л. Эйлер, А. Навье, Дж.Г. Стокс, У.Дж. Рэнкин, Г. Гельмгольц, Г. Кирхгоф, Дж.У. Рэлей, О. Рейнольдс, Г. Ламб, Н.Е. Жуковский, Л. Прандтль, С.А. Чаплыгин, Т. Леви-Чивитта, Л.И. Седов, А.И. Некрасов, Г. Биркгоф, Г. Вилль, Ж. Лерей, П. Роуч, Н.Е. Кочин, а также Дж. Бэтчелор и Л. Милн-Томсон.

Основы моделирования гидродинамических, в том числе, струйных процессов, были разработаны Бай Ши-и, Н.А. Слезкиным, Л.А. Вулис, В.П. Кашкаровым, М.А. Лаврентьевым, П. Роучем, Б.В. Шабат, М.И. Гуревичем, К. Флетчером, Дж. Хаппелем и другими отечественными и зарубежными учёными.

Н.Н. Рыкалин, Б.Е. Патон, А.А. Ерохин, С.Л. Мандельберг, В.П. Демянцевич, В.И. Столбов, И.М. Ковалев, S. Kou, В.А. Букаров, С.Р. Heiple, Г.И. Лесков, В.И. Махненко, В.Ф. Демченко, А.И. Акулов, И.В. Кривцун, В.А. Судник, В.А. Ерофеев, G.M. Oreper, Б.М. Березовский, В.П. Ерыгин, А.М. Болдырев, К.С. Tsao, В.А. Биржев, В.И. Оботуров, Т. Zacharia, В.Я. Кубланов, W. Zhang, В.К. Лебедев, Т. Debroy, Г.Г. Чернышов, V. Pavlyk, В.Ф. Кубарев, U. Dilthey, М.В. Авдеев, В.И. Коваль, G.G. Roy, И.В. Пентегов, В.Г. Кузьменко, Г.А. Туричин, А. Matsunawa, S. Yokoюа внесли значительный вклад в исследования гидродинамических явлений при сварке плавлением.

Анализ проведенных исследований и моделей [1-15] позволил осуществить их

классификацию в зависимости от действующих силовых факторов и типа принятой модели, выявить основные достоинства и недостатки. Были выделены особенности гидродинамических явлений в сварочной ванне. В качестве основных можно отметить: влияние потоков жидкого металла на передачу тепла от основного пятна дуги к фронту плавления [1-3, 9], большой градиент скорости потоков вследствие температурной зависимости вязкости жидкого металла [4, 5, 11], а также то обстоятельство, что характер движения потоков жидкого металла в передней и хвостовой частях ванны различен [4, 7, 8].

При использовании квазистационарных моделей получить геометрические параметры получаемого шва детерминированным способом достаточно сложно, поскольку не существует такого сечения сварочной ванны, которое бы совпадало с полным сечением закристаллизовавшегося шва. Полное сечение формируется путем последовательного наложения слоев кристаллизации соответствующих сечений сварочной ванны, находящихся в определенных точках в конкретный момент времени.

К тому же, картина распределения потоков жидкого металла, характерная для многих моделей, в которой наиболее мощный и скоростной поток под действием дуги устремлен к хвостовой части сварочной ванны, для многих случаев формирования наплавленного слоя не может быть принята в качестве расчетной схемы.

Цель статьи – основной целью работы является развитие теоретических и технологических основ повышения эффективности процесса электродуговой наплавки за счет управления гидродинамическими параметрами сварочной ванны, а также создание технологии, оборудования и систем управления для реализации таких технологических процессов.

Предметом исследования являлись гидродинамические процессы, происходящие в сварочной ванне, основные гидродинамические параметры и способы воздействия на них; динамика формообразования сварочной ванны, ее влияние на форму зоны проплавления и качество наплавленного слоя, оборудование и технология, позволяющие управлять формированием наплавленного слоя в режиме реального времени.

Изложение основного материала. Одной из причин необходимости изменения методики расчета процесса формообразования сварочной ванны является требование учитывать изменение вязкости жидкого металла по сечению ванны, поскольку этот показатель имеет значительное влияние на скорость потока. По этой же причине затруднено взаимодействие потоков, приводящее к турбулентному движению в периферийных участках сварочной ванны.

Сложность математического моделирования процессов тепло- и массопереноса в непосредственной близости от источника нагрева при сварке плавлением связана не только с взаимодействием множества силовых факторов, сконцентрированных в ограниченном объеме и высокой скоростью протекания процессов, но также и с тем, что характер взаимодействия силовых факторов зависит от места этого взаимодействия и коренным образом меняется при рассмотрении различных зон сварочной ванны, обуславливая ее сложную пространственную форму.

Таким образом, совершенствование физического моделирования гидродинамических процессов, протекающих в сварочной ванне, возможно при выделении в ее объеме зон в зависимости от доминирующего для каждой области силового фактора, с соответствующим изменением математической модели для каждой из зон. Необходимость такого разбиения подтверждается работами В.П. Ерыгина, В.Г. Кузьменко [7, 8] и других, посвященных процессам, протекающим при формообразовании шва. Стоит отметить, что многие авторы указывают на изменение силового баланса в зависимости от расположения объекта исследования в объеме сварочной ванны.

Обобщение экспериментальных данных и математических моделей, связывающих

процессы гидродинамики в сварочной ванне, показало, что направление и параметры потоков жидкого металла определяют ее форму и размеры. Эффективность управления последними связано с более точной идентификацией факторов и технологических параметров, которые влияют как на скорость движения потоков жидкого металла, так и на их характер распределения по объему сварочной ванны. Кроме того, необходимо уточнить движущие силы потоков жидкого металла в сварочной ванне при различных вариантах технологии, поскольку управление формообразованием шва предполагает количественную оценку геометрических параметров зон проплавления и наплавки, непосредственно связанных с показателями качества сварных соединений.

Методика определения значимых факторов формообразования предусматривает разработку математической модели процесса плавления основного металла. Поэтому, в данной работе на основании теории, используемой в гидродинамике и, в частности, в теории струй, разработана модель распространения зоны проплавления при неподвижном источнике.

Для аналитического решения задачи о струе-источнике взамен детальных начальных условий достаточно установить интегральное соотношение для величины начального значения полного потока импульса (в проекции на ось симметрии Ox):

$$I_x = \int_{(F)} \rho u_{x_0}^2 dF, \quad (1)$$

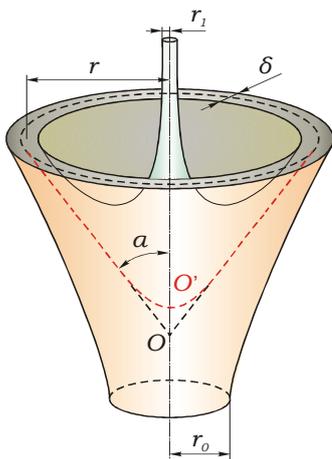
где ρ – плотность жидкости,

u_{x_0} – осевая компонента вектора скорости в выходном сечении F .

Для среды тех же физических свойств, что и жидкости в струе, процесс ее распространения сводится к выравниванию начального профиля скорости. Вследствие вязкости струя вовлекает в движение окружающий ее расплавленный основной металл, предавая ему часть начального импульса и, снижая тем самым, значения скорости на оси и в поперечных сечениях.

Для рассматриваемого случая проплавления полубесконечной пластины капельной струей жидкого металла расчетная схема представлена следующим образом (рис. 1).

Рис. 1 – Расчетная схема для решения осесимметричной задачи



Вдоль оси симметрии (ось z) навстречу друг другу движутся струи ρ_0 плотностью ρ_0 и r_1 плотностью ρ_1 ($r_1 < r_0$), со скоростью v_0 и v_1 соответственно. В зоне соударения струй их свободные поверхности Ω_0 и Ω_1 , ограничивающие т.н. «пелену» с шириной δ , асимптотически приближаются к поверхности раздела Ψ (на рис. 1 изображена пунктиром). Для несжимаемой жидкости значение $\delta \rightarrow 0$ с увеличением расстояния r от оси вращения:

$$\delta \approx \frac{r_0^2 + r_1^2}{2r} \quad (2)$$

В этом случае поверхность раздела приближается к конусу с вершиной в некоторой точке O и углом α между образующей и осью симметрии.

Поверхность раздела Ψ является также поверхностью раздела сред, т. е. представляет собой границу зоны проплавления, на которой значение составляющей скорости частиц жидкости по направлению нормали к этой поверхности $v_n = 0$. Учет вязкости приведет к замене этого условия на следующее: $\vec{v} \rightarrow 0$ для пограничного слоя $\Delta \leq \varepsilon$.

Изменение параметров струи вдоль по потоку определяется совокупностью интегральных соотношений количества движения и энергии:

$$\begin{cases} K = 2\pi^j \int_0^\delta u(u - u_\delta) y^j dy = const \\ \frac{d}{dx} \int_0^\delta u(u^2 - u_\delta^2) y^j dy = -2 \int_0^\delta \frac{\tau}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y} y^j dy \\ d(\kappa x) = \mp \delta \frac{u_m du_m}{2^j \lambda u_{1m}^2} \end{cases} \quad (3)$$

Строгое решение требует операций интегрирования уравнений движения и неразрывности при заданном законе внутреннего трения и заданных начальных условиях.

Для практического использования параметров движения достаточным условием является построение гидродинамической сетки, представляющую собой совокупность линий тока и эквипотенциальных линий. Если эти функции не могут быть представлены в аналитическом виде, с достаточной степенью точности такое построение можно осуществить, основываясь лишь на данных о границах потока. Однако, в отличие от большинства задач гидравлики и гидродинамики, положение этих границ при формообразовании сварного шва не является исходным условием, а должно быть определено в ходе решения.

Для построения профилей скорости в поперечных сечениях струи профиль $\tau(y)$ определялся в виде полинома:

$$\tau = c_0 + c_1 y + c_2 y^2 + \dots + c_n y^n \quad (4)$$

Коэффициенты этого полинома определяются из условий на оси струи ($y = 0$, $u = u_m$) и ее границе ($y = \delta$, $u = u_\delta$).

С учетом начальных и граничных условий профиль струи:

$$\Delta u^0 = 1 - 60 f_2(\eta) + \lambda [f_1(\eta) - 12 f_2(\eta)], \quad (5)$$

где $\eta = y/\delta$.

Неизвестные функции, входящие в (5), определялись статистической обработкой результатов измерения параметров зон проплавления макрошлифов, полученных дуговой точечной наплавкой под флюсом для различных сечений проволочного и ленточного электродов и применяемых диапазонов скоростей подачи (силы тока) в зависимости от времени горения дуги.

На рис. 2 представлен расчетный график зависимости относительной скорости движения струи от времени, из которого следует, что, по истечении 6 сек, профиль скоростей по сечению ванны выравнивается и границы зоны проплавления увеличиваются во всех направлениях более равномерно, в то время как абсолютное значение скорости уменьшается до 0. Этот факт подтверждает и уменьшение величины расхождения между расчетными и экспериментальными данными в этом интервале времени (рис. 3).

В случае использование ленточного электрода в качестве расчетной используется схема распространения плоской струи конечной ширины. Основное допущение состоит в равномерности оплавления поперечного сечения ленты, перемещение дуги по торцу электрода не учитывается.

Разработанная методика позволяет определить распределения скоростей потоков жидкого металла при изменении скорости подачи проволочного и ленточного электродов по определенному закону. В этом случае функция изменения скорости $\varphi(V0)$ используется в качестве аргумента системы (3).

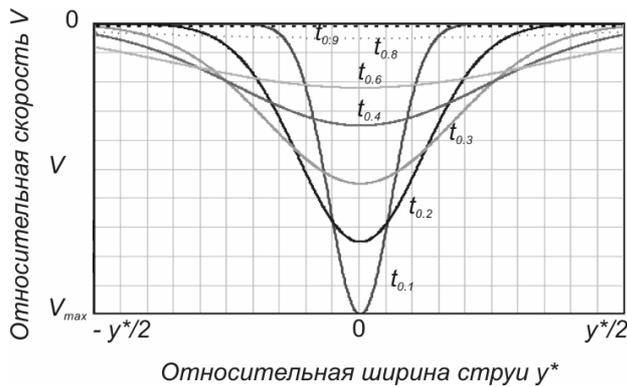


Рис. 2 – Зависимость изменения относительной скорости жидкого металла от времени

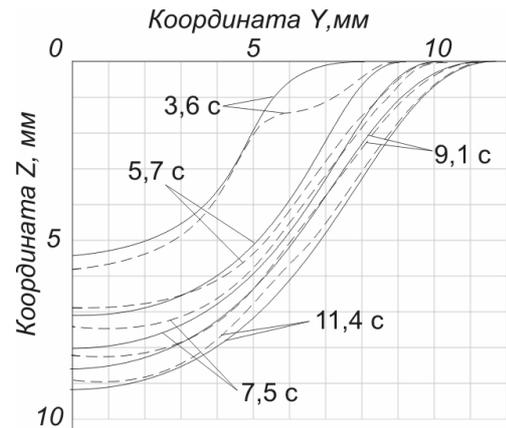


Рис. 3 – Расчетные и экспериментальные (пунктир) контуры сварочной ванны

Изменяя распределение электродинамических сил в сварочной ванне, можно влиять на гидродинамические процессы в сварочной ванне, которые в свою очередь определяют формирование шва, его структуру, состав и механические свойства. Для случая наплавки материалов, отличных от основного металла, главной задачей является уменьшение доли основного металла в наплавленном и улучшение коэффициента формы шва. Это целесообразно для рационального использования легирующих элементов, если они вводятся через электрод или флюс, а также для повышения производительности наплавочных работ, снижения затрат на механическую обработку наплавленной поверхности.

Распространение результатов расчета для неподвижной струи-источника на случай, когда скорость сварки не равна нулю, предполагает использование функциональной зависимости, связывающей время действия неподвижного источника в точке O со скоростью движущегося в окрестности этой точки источника. В случае перемещения электрода максимум проплавления находится на определенном расстоянии Δ от оси электрода, поэтому максимальная глубина проплавления не совпадает с максимальным усилением, сумма которых и дает высоту шва h после его кристаллизации. Данный факт редко учитывается в расчетных схемах, поскольку передняя стенка сварочной ванны представляется как часть окружности с центром на торце электрода не только для неподвижного, но и для подвижного источника тепла. Таким образом, параметром, определяющим степень асимметрии сварочной ванны, является значение скорости сварки, которое может служить основным входным параметром при решении задач анализа на недетерминированных моделях.

В качестве расчетной схемы (рис. 4) использовалась схема перемещения квазистационарного струйного источника с радиусом R_0 , движущегося со скоростью $V_{св}$, фиксируемого в моменты t_i (с шагом Δ).

Текущее расположение струи определяется точкой O' , в которой действует мгновенный источник с нормальным круговым распределением радиусом r_i . Шаг Δ_i определяет время t' , за которое потоки жидкого металла струи достигают области, ограниченной радиусом R_0 . Предполагалось, что по истечении шага по времени t' начинается кристаллизация сварочной ванны данного контура, ограниченного изотермой $T_{пл}$, и мгновенный источник перемещается на шаг Δ . В качестве условия оптимизации процесса использовалось условие $\Delta' = \Delta$, т.е. в данном случае обеспечивается условие максимальной зоны проплавления при данной мощности источника тепла. В этом случае необходимо обеспечить минимальный расход энергии при заданных параметрах шва.

При необходимости минимальных размеров глубины проплавления и доли участия основного металла оптимизационное условие выглядит следующим образом: $\Delta' = \beta\Delta$, где β - коэффициент, зависящий от технологических условий.

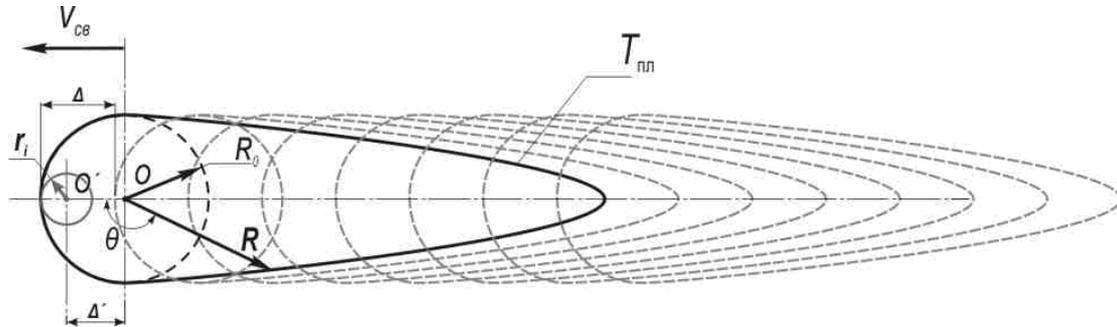


Рис. 4 – Расчетная схема для определения размеров сварочной ванны в случае перемещения источника

На рис. 5, 6 представлены зависимости $R_0(V)$ для различных сечений электрода, и зависимости параметров кривизны хвостовой части ванны R и δ от угла поворота радиус вектора θ .

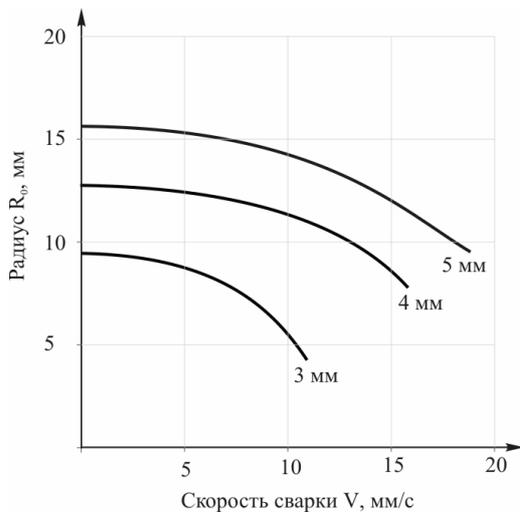


Рис. 5 – Зависимость радиуса R_0 от скорости сварки

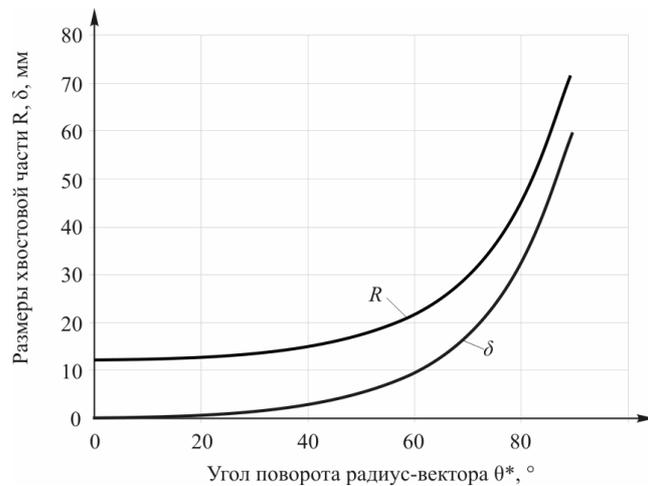


Рис. 6 – Зависимость параметров хвостовой части от угла θ^* ($d_{эл} = 4$ мм, $V_{св} = 9,6$ мм/с)

Сравнение расчетных показателей с результатами экспериментальных исследований параметров сварочной ванны при наплавке под флюсом малоуглеродистых и нержавеющей сталей показало хорошую сходимость, средняя ошибка составила 8,3%.

Для разработки усовершенствованной технологии наплавки с управлением формообразованием сварочной ванны были рассмотрены технологические варианты реализации наплавленных слоев, позволяющих обеспечить оптимальное тепловложение в основной металл, стабильное проплавление и отсутствие дефектов формирования валика.

В случае изменение угла наклона наплавляемой поверхности к горизонту или наличия радиуса кривизны, а также при наплавке тел вращения малого диаметра, использование форсированных режимов может привести к ухудшению качества наплавленного металла и появлению таких дефектов как наплывы и потеки. Это связано с влиянием

на формирование наплавленного шва сил тяжести. Поскольку длина сварочной ванны зависит от тепловложения, при вращении изделия жидкие металл и шлак могут оказаться на участке, где силы тяжести не компенсируются реакцией твердой поверхности изделия.

Проведение исследований влияние сил тяжести на формирование наплавленного валика позволило определить зависимости изменения параметров потоков жидкого металла в ванне и выработать технологические рекомендации на их основе для нанесения качественного наплавленного слоя на наклонные и криволинейные поверхности (рис. 7).

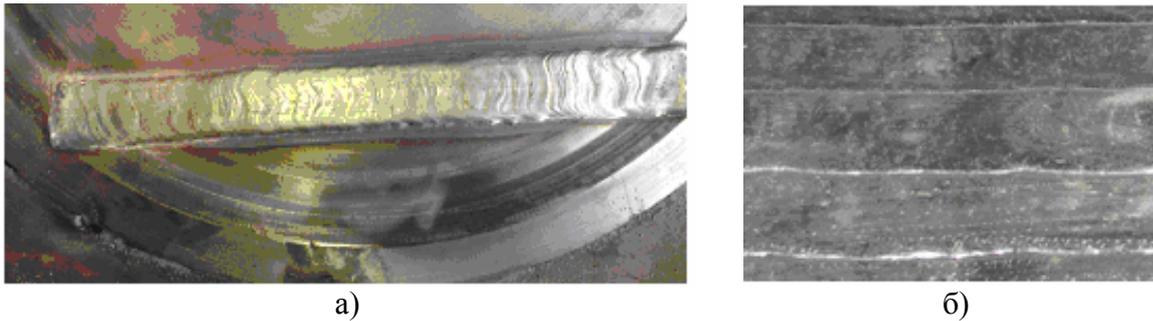


Рис. 7 – Валик (а) и наплавленный слой (б) на поверхности с переменным наклоном к горизонту

Перспективным направлением развития технологических процессов наплавки деталей и инструмента являются способы формирования слоёв с регламентированным распределением свойств, что позволяет повысить служебные характеристики изделий, улучшить качество обрабатываемой ими продукции. В этом случае используются технологические процессы наплавки со сложной траекторией перемещения электрода относительно наплаваемой поверхности.

При этом во время дуговой наплавки формируются валики волнистой, зигзагообразной, дугообразной формы, взаимопереплетённые по определённому закону швы (рис. 8). Взаимное перекрещивание наплавленных валиков, ориентация их под оптимальным углом к действию максимальных рабочих нагрузок позволяет обеспечить получение рабочей поверхности с высокими показателями износостойкости, разгаростойкости, в существенной степени снизить проявления неоднородности свойств наплавленного слоя.



Рис. 8 – Поверхность, наплавленная под углом к образующей

Для реализации такой технологии необходимо применение специализированного наплавочного оборудования, методики расчёта конфигурации швов и выбора параметров их наплавки, а также системы автоматического регулирования этих

параметров в соответствии с законом управления.

Построение систем контроля и управления процессом наплавки предполагает выбор в качестве управляющих сигналов параметров, имеющих физически адекватную

связь между измеряемым сигналом и поведением сварочной ванны и позволяющих преобразовывать измеряемый сигнал в технологические значимые параметры: глубину и ширину сварного шва в режиме реального времени.

Кроме того, необходимыми свойствами являются помехозащищенность и возможность своевременного измерения и обработки сигнала.

В настоящее время для целей контроля используются информация о распределении температурного поля в зоне сварного шва или ЗТВ, получаемое с помощью контактных или бесконтактных датчиков. Несмотря на тот факт, что по распределению температуры можно контролировать состояние зоны проплавления, невозможно оперативно использовать эту информацию для адекватного изменения технологических параметров с динамическим поведением сварочной ванны.

Поскольку в рассмотренных выше моделях в качестве исходных параметров выступают скорости истечения и перемещения струи, разработаны алгоритмы и система управления процессом наплавки слоев различной конфигурации, в которых эти параметры или их технологические аналоги (скорости подачи и перемещения электрода) используются в качестве управляющих сигналов.

Выводы:

1. Теоретический анализ конвективных процессов в сварочной ванне показал, что движение источника нагрева не приводит к значительному перераспределению поля скоростей по сечению сварочной ванны, при этом интенсивность потоков жидкого металла снижается по направлению к хвостовой части.
2. Показано, что формирование химического состава и структуры переходной зоны происходит под действием связанных и взаимно лимитирующих друг друга процессов проплавления основного металла и движения сварочной ванны. Установлено, что влияние этих процессов сказывается также непосредственно на глубине и форме зоны проплавления.
3. Разработаны динамические модели формирования сварочной ванны и формирование связанных с этим дефектов наплавленного шва. На основе этих моделей проанализирована взаимосвязь таких информационных сигналов, как скорость подачи электрода и скорость перемещения струи – источника как параметров системы управления технологическим процессом наплавки.
4. Созданные математические модели гидродинамических процессов в сварочной ванне положены в основу разработанного программного обеспечения и реализованной аппаратно системы управления наплавочным оборудованием.

Список использованных источников:

1. Лесков Г.И. К вопросу построения динамической модели сварочной ванны при электродуговой сварке / Г.И. Лесков, С.В. Пустовойт // Автоматическая сварка. – 2011. – № 5. – С. 48-51.
2. Evolution of titanium arc weldment macro and microstructures-modelling and real time mapping of phases / Z. Yang, J.W. Elmer, J. Wong, T. Debroy // Welding Journal. – 2000. – vol. 79, № 4. – P. 97-112.
3. Размышляев А.Д. Расчетная оценка влияния конвекции жидкого металла на размеры сварочной ванны при дуговой наплавке / А.Д. Размышляев, В.Р. Маевский // Автоматическая сварка. – 2001. – №1. – С.11-15.
4. Zang W. Modelling of solidified free surface profile during gma welding / W. Zhang, T. Debroy // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах. (Под ред. проф. В.И. Махненко) Сб. трудов межд. конф., 16-20 сент. 2002 г., пос. Кацивели, Крым, Украина- ИЭС им. Е.О. Патона

- НАН України, Київ 2002г. С. 135-141.
5. Roy G.G. Motion of liquid Metal in a GTA Weld Pool with Free Surface / G.G. Roy T. DebRoy // <http://www.ems.psu.edu/modeling/> – The Pennsylvania State University. – 2002.
 6. Redding C.G. Fume model for gas metal arc welding / C.G. Redding // *Welding Journal*. – 2002. – vol. 81, № 3. – P. 95-103.
 7. Ерыгин В.И. Особенности движения жидкого расплава в сварочной ванне при наплавке с металлической крупкой / В.И. Ерыгин // *Сварочное производство*. – 1980. – №6. – С. 6–8.
 8. Кузьменко В.Г. О характерных зонах сварочной ванны при дуговой сварке под флюсом / Кузьменко В.Г., Галинич В.И., Токарев В.С. // *Автоматическая сварка*. – 1997. – № 5. – С. 24-27.
 9. Акулов А.И. Особенности течения жидкого металла в сварочной ванне при сварке под флюсом / А.И. Акулов, Ю.В. Доронин, В.А. Осинцев // *Сварочное производство*. – 1986. – № 10. – С. 10-15.
 10. Болдырев А.М. К расчету гидродинамических параметров жидкого металла на дне сварочной ванны при дуговой сварке / А.М. Болдырев, В.А. Биржев, А.В. Черных // *Сварочное производство*. – 1992. – №2. – С. 31-33.
 11. Matsunawa A. Convection in weld pool and its effect on penetration shape in stationary arc welds / A. Matsunawa, S. Yokoya, Y. Asako // *Transactions of JWRI*. – 1987. – vol. 16, № 2. – P. 229-236.
 12. Лесной А.Б. Моделирование гидродинамики и массообмена при электронно-лучевом переплаве титановых сплавов / А.Б. Лесной, В.Ф. Демченко // *Проблемы специальной электротехнологии*. – 2003. – № 3. – С. 19-23.
 13. Kou S. Computer simulation of convection in moving arc weld pools / S. Kou, Y.H. Wang // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 1986. – Vol. 17A, № 12. – P. 2271-2277.
 14. Lu S. Marangoni convection and welding penetration in A-TIG welding / S. Lu, F. Hideo-toshi, H. Sugiyama, K. Nogi // *Transactions of JWRI*. – 2003. – vol. 32, № 2. – P. 79-82.
 15. Lei Y. Numerical analysis of the effect of sulfur content upon fluid flow and weld pool geometry for type 304 stainless steel / Y. Lei, Y. Shi, H. Murakawa, Y. Ueda // *Transactions of JWRI*. – 1997. – vol. 26, № 1. – P. 1-8.

Bibliography:

1. Leskov G.I. About the construction of a dynamic model of weld pool in arc welding / G.I. Leskov, S.V. Pustovoit // *Avtomaticheskaya svarka*. – 2011. – № 5. – P. 48-51. (Rus.)
2. Evolution of titanium arc weldment macro and microstructures - modelling and real time mapping of phases / Z. Yang, J.W.Elmer, J.Wong, T.Debroy // *Welding Journal*. – 2000. – vol. 79, № 4. – P. 97-112.
3. Razmyshljaev A.D. The estimated effect of liquid metal convection on the weld pool size in arc surfacing / A.D. Razmyshljaev, V.R. Mayevskiy // *Avtomaticheskaya svarka*. – 2001. – № 1. – P. 11-15. (Rus.)
4. Zang W. Modelling of solidified free surface profile during gma welding / W. Zhang, T. Debroy // *Mathematical modeling and information technologies in welding and related processes*. (Edited by Prof. V.I. Makhnenko) Proc. of Sixth International Conference, 16-20 September, 2002., vil. Katsiveli, Big Yalta, Crimea, Ukraine – E.O. Paton Electric Welding Institute, Kiev / – 2002. – P. 135-141.
5. Roy G.G. Motion of liquid Metal in a GTA Weld Pool with Free Surface / G.G. Roy T. DebRoy // <http://www.ems.psu.edu/modeling/> – The Pennsylvania State University. – 2002.

6. Redding C.G. Fume model for gas metal arc welding / C.G. Redding // *Welding Journal*. – 2002. – vol. 81, № 3. – P. 95-103.
7. Erygin V.I. Features of the liquid melt motion in the weld pool during surfacing with metal crumbs / V.I. Erygin // *Svarochnoe proizvodstvo*. – 1980. – № 6. – P. 6-8. (Rus.)
8. Kuzmenko V.G. About weld pool areas during submerged arc welding / V.G. Kuzmenko, V.I. Galinich, V.S. Tokarev // *Avtomaticheskaya svarka*. – 1997. – № 5. – P. 24-27. (Rus.)
9. Akulov A.I. Properties of the liquid metal in the weld pool in submerged arc welding / A.I. Akulov, Yu.V. Doronin, V.A. Osintcev // *Svarochnoe proizvodstvo*. – 1986. – № 10. – P. 10-15. (Rus.)
10. Boldyrev A.M. Calculation of the hydrodynamic parameters of the liquid metal at the bottom of the weld pool during arc welding / A.M. Boldyrev, V.A. Birzhev, A.V. Chernyh // *Svarochnoe proizvodstvo*. – 1992. – № 2. – P. 31-33. (Rus.)
11. Matsunawa A. Convection in weld pool and its effect on penetration shape in stationary arc welds/ A. Matsunawa, S. Yokoya, Y. Asako // *Transactions of JWRI*. – 1987. – vol. 16, № 2. – P. 229-236.
12. Lesnoy A.B. Simulation of fluid flow and mass transfer in electron-beam melting of titanium alloys / A.B. Lesnoy, V.F. Demchenko // *Sovremennaya electrometallurgiya*. – 2003. – №3. – P. 19-23. (Rus.)
13. Kou S. Computer simulation of convection in moving arc weld pools / S. Kou, Y.H. Wang // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 1986. – Vol. 17A, № 12. – P. – 2271-2277.
14. Lu S. Marangoni convection and welding penetration in A-TIG welding / S.Lu, F. Hidetoshi, H. Sugiyama, K. Nogi // *Transactions of JWRI*. – 2003. – vol. 32, № 2. – P. 79-82.
15. Lei Y. Numerical analysis of the effect of sulfur content upon fluid flow and weld pool geometry for type 304 stainless steel / Y. Lei, Y. Shi, H. Murakawa, Y. Ueda // *Transactions of JWRI*. – 1997. – vol. 26, № 1. – P. 1-8.

Рецензент В.И. Щетинина
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.05.2013