

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СВЯЗИ ФОРМЫ ПРОПЛАВА С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ БАЛАНСОМ ПУЧКА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

В.Н. Ластовиря



**ЛАСТОВИРЯ
Вячеслав
Николаевич**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оборудования и технологии сварочного производства МГИУ. Специалист в области автоматизации сварочных процессов. Автор более 100 научных трудов, изобретений и учебных пособий.

Введение

Способ электронно-лучевой сварки (ЭЛС) применяется не только, когда необходим глубокий проплав, но также при сварке изделий малой толщины в основном для изготовления сварных конструкций и изделий ответственного назначения из химически активных и тугоплавких металлов, например в атомной энергетике. Процесс сварки выполняется в вакууме, что обеспечивает высокое качество соединения.

© Ластовиря В.Н., 2007

Сущность процесса ЭЛС состоит в воздействии на соединяемые материалы пучком ускоренных электронов, кинетическая энергия которых при их торможении превращается в теплоту. Значения плотности мощности при нагреве достигают 10^8 Вт/см², что дает скорость ввода тепла большую, чем скорость его диссипации. В условиях инерции тепла происходит интенсивный локальный нагрев, плавление и испарение металла. Сила реакции паровой струи «продавливает» в расплаве каверну – парогазовый кратер. При перемещении кратера осуществляется формирование сварного шва, размеры и форма проплава которого в первом приближении, без учета гидродинамики расплава сварочной ванны, определяются размерами и формой кратера. Сама же форма определяется энергетическим балансом электронного пучка.

Как правило, сварочные электронные пучки осесимметричны с нормальным круговым распределением плотности мощности в сечении [1]. Формируемый таким пучком парогазовый кратер в меридиональном сечении также можно представить гауссовой кривой, но ее параметры не соответствуют параметрам, принятым в сварочном производстве для характеристики шва, а именно: глубина проплава H и ширина шва B .

С этих позиций форму кратера целесообразно аппроксимировать параболоидом вращения (рис. 1). Тогда основными параметрами, характеризующими форму проплава в сечении, перпендикулярном сварному шву, аппроксимированную параболой, можно считать глубину H и радиус горловины кратера R :

$$\frac{z}{H} = 1 - \frac{r^2}{R^2}, \quad (1)$$

где H и $R=B/2$ – указанные параметры, определяющие конкретный вид выражения формы кратера (1).

Правомерность представления сечения кратера параболой подтверждается также тем, что разложение в ряд Тейлора гауссовой кривой вида $z/H = \exp(-r^2/R^2)$ в окрестности начала координат в первом приближении выражается параболической зависимостью (1).

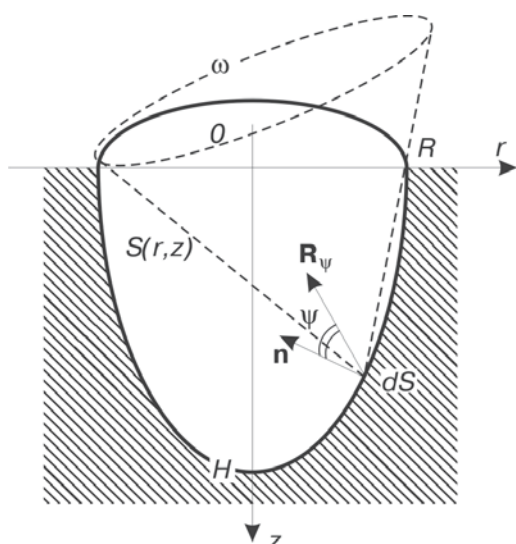


Рис. 1. Поперечное сечение парогазового кратера параболической формы

Наличие в ходе ЭЛС неконтролируемых возмущений, действующих в большей части на источник энергии – электронный пучок [2], требует введения контроля или управления процессом формообразования шва для гарантированного получения его геометрических параметров в пределах допуска, в частности глубины проплава. Отсутствие надежных методов непосредственного измерения текущей глубины проплава приводит к попыткам ее оценки по математическим моделям.

Исследователями получены математические зависимости для определения геометрических параметров проплава, как правило, с помощью традиционных методов на основе физической картины воздействия пучка на металл. Но использование этих соотношений для контроля и управления процессом в реальном времени не представляется возможным в силу обобщенного рассмотрения процесса и включения физических величин, которые априори трудноопределимы. А главное, отсутствует привязка к конкретному источнику энергии, сформированному на каком-то определенном сварочном оборудовании, без чего, не будучи «настроенными» на данный процесс ЭЛС, оценочные модели дают большую погрешность оценки текущей глубины проплава [3].

Постановка задачи

Таким образом, задача состояла в идентификации математической связи компонент энергетического баланса пучка с геометрическими параметрами формы кратера в простом виде, удобном для организации контроля и управления процессом в реальном времени, предполагая возможность «настройки» этого соотношения на конкретные условия сварочного процесса.

Был принят подход к дифференциации полной мощности пучка с учетом компоненты, теряемой на излучение из кратера, которая при малых коэффициентах формы проплава $K=H/B$ достигает довольно больших значений (до 30%). При больших же значениях K , соответствующих «кинжальному» проплавлению, мощность, теряемая на излучение, весьма мала (до 2%), что обеспечивает высокий эффективный КПД процесса.

Будем представлять мощность P , подводимую пучком, в виде двух основных составляющих: расходуемую на нагрев и плавление металла и отводимую в свариваемое изделие за счет теплопроводности, и испускаемую из кратера во внешнее пространство. Последняя содержит целый ряд составляющих, среди которых определяющими являются потери на от-

раженные электроны, испарение металла и электромагнитное излучение [3]. Первую (P_n) будем называть мощностью, поглощаемой свариваемым изделием, а вторую (P_{λ}) – мощностью, испускаемой из кратера. Таким образом, можем записать энергетический баланс:

$$P = P_n + P_{\lambda} \quad (2)$$

Обе составляющие зависят от формы парогазового кратера и площади его поверхности [4] и могут быть оценены в ходе сварочного процесса по яркости парогазового факела над кратером [5].

Одним из наиболее сложных случаев для контроля и управления процессом является случай несквозного проплавления на глубину большую 5–8 мм [6], когда ухудшается корреляция измеряемых параметров с глубиной провара. Рассмотрим данный случай, сделав следующие допущения: а) плотность мощности излучения из парогазового кратера постоянна в каждой точке его поверхности; б) толщина жидкой прослойки на стенках кратера мала по сравнению с его диаметром; в) парогазовый кратер осесимметричен.

Определение компонент энергетического баланса

Выразим составляющие уравнения (2) через параметры формы кратера вида (1). Мощность, поглощаемая изделием вследствие теплопроводности, разделяется на две составляющие (рис. 2). Первая (P_{λ}) расходуется на разогрев передней, относительно движущегося

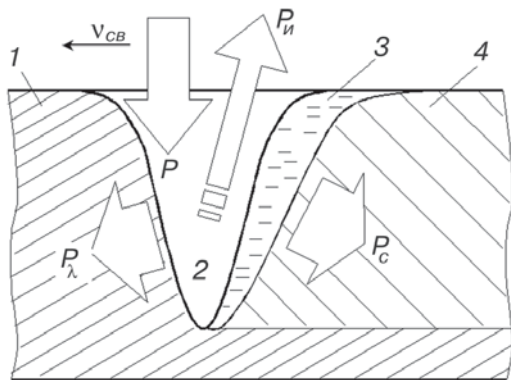


Рис. 2. Схема энергетического баланса электронного пучка в парогазовом кратере: 1 – основной металл; 2 – кратер; 3 – жидкий металл; 4 – закристаллизовавшийся металл шва

кратера, части образца до температуры плавления в непосредственной близости от его передней стенки. Далее, часть разогретого металла перед фронтом плавления переходит в жидкую фазу, которая доводится до температуры T_n жидкой прослойки (на рис. 2 не показана), близкой к температуре кипения. На это затрачивается мощность P_c , величина которой равна теплосодержанию секундного объема плавления металла. Под действием давления испарения и термокапиллярных сил, обусловленных перепадом температуры и сил поверхностного натяжения, жидкий металл вытесняется из передней части кратера в хвостовую часть сварочной ванны. Там при остывании кристаллизуется и отдает свою энергию задней части образца. Таким образом, мощность, поглощаемую материалом образца путем теплопроводности, можно выразить в виде суммы:

$$P_n = P_{\lambda} + P_c \quad (3)$$

Потери за счет теплопроводности определяются тепловым потоком от поверхности кратера в свариваемое изделие, который зависит от коэффициента теплопроводности λ и приращения температуры по нормали к поверхности в соответствии с законом теплопроводности Фурье. Полагая $\lambda = \text{const}$, получим:

$$P_{\lambda} = \lambda \iint_S (\text{grad } T(x, y, z), \mathbf{N}) dS, \quad (4)$$

где $\mathbf{N}$ – единичный вектор внешней нормали элемента поверхности кратера dS .

Мощность, затраченная на плавление и обеспечение перепада температуры в слое расплава в интервале $[T_{пл}; T_n]$ для секундного объема плавления V_1 , равна:

$$P_c = \left[C_{[T_{пл}; T_n]} \cdot \frac{(T_{пл} + T_n)}{2} + L_{пл} \right] V_1 \rho_{[T_{пл}; T_n]}, \quad (5)$$

где $C_{[T_{пл}; T_n]}$ и $\rho_{[T_{пл}; T_n]}$ – средние значения удельной массовой теплоемкости и плотности жидкого металла для указанного интервала температур; $L_{пл}$ – скрытая теплота плавления.

Для параболы (1)

$$V_1 = 4HRv_{св}/3,$$

где $v_{св}$ – скорость сварки.

Определим мощность, отводимую от поверхности кратера за счет излучения, исполь-

зую закон Ламберта для интенсивности изотропного излучения как потока в заданном направлении $\mathbf{R}_\psi$ (см. рис. 1) с единицы поверхности в единице телесного угла, Вт/(м²·срад):

$$q_\psi = q_n \cos \psi \quad (6)$$

где ψ – угол между единичным вектором внутренней нормали $\mathbf{n}$ в данной точке поверхности и заданным направлением; q_n – энергетическая яркость стенки канала как поток в единице телесного угла с единичной поверхности, нормальной к направлению излучения.

Используя скалярное произведение векторов, выражение (6) можем переписать в виде:

$$q_\psi = q_n (\mathbf{R}_\psi, \mathbf{n}), \quad (7)$$

где $\mathbf{R}_\psi = \mathbf{R}_\psi(r, \varphi, z)$ – единичный вектор в направлении горловины кратера.

В этом случае плотность мощности излучения с поверхности кратера S в пределах телесного элементарного угла $d\omega$ будет равна, Вт/м²:

$$dE = q_\psi d\omega. \quad (8)$$

Заметим, что излучение с каждого элемента поверхности dS кратера распространяется в пределах телесного угла, опирающегося на полусферу и равного 2π срад. Однако из кратера наружу выйдет только часть этого излучения, которая не попадает на стенки. Эта доля излучения распространяется в пределах телесного угла ω , который определяет часть пространства кратера, ограниченную конической поверхностью с вершиной в точке излучения и образующей, проходящей по окружности горловины кратера (см. рис. 1).

Таким образом, с элементарной поверхности канала dS через горловину канала будет отводиться излучение с плотностью мощности, равной

$$E = q_n \iint_{\omega} (\mathbf{R}_\psi, \mathbf{n}) d\omega. \quad (9)$$

Полагая $q_n = \text{const}$ и интегрируя выражение (9) по поверхности канала S , определим мощность, испускаемую во внешнее пространство, пренебрегая мощностью, которая излучается после отражения от стенок:

$$P_{\text{н}} = q_n \iint_S \left\{ \iint_{\omega} (\mathbf{R}_\psi, \mathbf{n}) d\omega \right\} dS. \quad (10)$$

Расчет мощности излучения [7] показывает, что основная доля в излучение вносится верхней частью боковой поверхности парогазового кратера, а его величина зависит от энергетической яркости стенок, глубины и ширины кратера. Причем с ростом глубины величина потерь достигает предельного значения, пропорционального площади πR^2 горловины кратера. Заметная зависимость мощности излучения от глубины наступает только при уменьшении коэффициента формы кратера до значений, численно равных величине радиуса горловины в миллиметрах, т. е. $K \leq 3$.

Методика идентификации искомого уравнения связи

Интегральные выражения (4) и (10) с учетом (5) в общем виде устанавливают связь геометрических параметров кратера с компонентами энергетического баланса (2). После взятия интегралов ее можно представить в виде нелинейной системы двух алгебраических уравнений относительно H и R :

$$\begin{aligned} P_{\text{н}} &= P_{\text{н}}(H, R), \\ P_{\text{н}} &= q_n P_{\text{н}}(H, R). \end{aligned} \quad (11)$$

Основной особенностью данной системы является то, что во втором уравнении пока неизвестная энергетическая яркость стенки кратера q_n входит множителем к нелинейной функции. Разрешить данные выражения относительно геометрических параметров весьма проблематично.

Для решения этой задачи, выражение (11) необходимо линеаризовать в окрестности интересующих нас значений глубины и ширины проплава шва: $[H_1; H_2]$, $[R_1; R_2]$. Такими интервальными диапазонами параметров могут служить допуски на значения геометрических параметров H_0 и R_0 , которые необходимо обеспечить в данном технологическом процессе сварки.

Проще всего осуществить линеаризацию можно, пользуясь методами регрессионного анализа. Для этого необходимо задать равномерную сетку значений на геометрических параметрах в области линеаризации. Затем, задав значения теплофизических характеристик,

входящих в систему (11), в каждой точке решетки сможем вычислить отклик – значения P_n и P_{in} как некоторые точки криволинейных поверхностей над плоскостью геометрических параметров. По полученным данным определяем линейное приближение в виде уравнений плоскостей наилучшим образом аппроксимирующих поверхность отклика:

$$\begin{aligned} P_n &= a_0 + a_1 H + a_2 R; \\ \frac{P_{in}}{q_n} &= b_0 + b_1 H + b_2 R, \end{aligned} \quad (12)$$

где a_i, b_i ($i=0,1,2$) – коэффициенты уравнений регрессии.

Для этого необходимо сформировать матрицу планирования $\mathbf{U}$ и векторы откликов $\mathbf{P}_n$ и $\mathbf{P}_{in}$ в соответствии с введенной сеткой факторов $H_1, H_2, \dots, H_N; R_1, R_2, \dots, R_N$:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 1 & H_1 & R_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & H_N & R_N \end{pmatrix}; \quad \mathbf{P}_n = \begin{pmatrix} P_{n1} \\ \dots \\ P_{nN} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{P}_{in} = \begin{pmatrix} P_{in1} \\ \dots \\ P_{inN} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Затем, на основании метода наименьших квадратов минимизировать сумму квадратов невязок $\varepsilon_1(P_n)$ и $\varepsilon_1(P_{in})$ по всем точкам решетки для значений откликов компонент мощности поглощения и излучения:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2(P_n) &= (\mathbf{P}_n - \mathbf{U}\mathbf{A})^T \cdot (\mathbf{P}_n - \mathbf{U}\mathbf{A}); \\ \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2(P_{in}) &= (\mathbf{P}_{in} - \mathbf{U}\mathbf{B})^T \cdot (\mathbf{P}_{in} - \mathbf{U}\mathbf{B}) \end{aligned} \quad (14)$$

где T – знак транспонирования; $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ – векторы-столбцы коэффициентов регрессионных уравнений (12).

На основании минимизации остаточных сумм квадратов невязок (14) будем иметь значения этих коэффициентов, которые находятся по известным формулам:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = (\mathbf{U}^T \cdot \mathbf{U})^{-1} \cdot \mathbf{U}^T \mathbf{P}_n; \\ \mathbf{B} &= \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = (\mathbf{U}^T \cdot \mathbf{U})^{-1} \cdot \mathbf{U}^T \mathbf{P}_{in}. \end{aligned} \quad (15)$$

Разрешая теперь (12) относительно геометрических параметров кратера, получим искомые соотношения:

$$\begin{aligned} H &= \alpha_0 + \alpha_1 P_n + \alpha_2 \frac{P_{in}}{q_n}; \\ R &= \beta_0 + \beta_1 P_n + \beta_2 \frac{P_{in}}{q_n}, \end{aligned} \quad (16)$$

где α_i, β_i , ($i=0,1,2$) – коэффициенты уравнений. Уравнения [16] можно использовать как уравнения связи для оценки формы проплава сварного шва в рассматриваемой области геометрических параметров при условии измерения компонент энергетического баланса [8].

Чтобы достичь удовлетворительной точности оценки формы, соотношения (16) должны быть адекватны процессу ЭЛС в данной локальной области параметров. Добиться этого можно «настройкой» оценочной модели на конкретные условия технологического процесса, что достигается экспериментальным уточнением коэффициента q_n .

Чтобы выполнить операцию настройки модели, необходимо получить несколько экспериментальных значений компонент энергетического баланса и соответствующих им параметров формы в области $\{[H_i; H_2] \times [R_i; R_2]\}$. Для этого необходимо сварить шов, геометрические параметры которого находятся в рассматриваемой локальной области в непосредственной близости к H_0 и R_0 . В процессе сварки выполняют регистрацию компонент мощности поглощения и излучения или соответствующих им наблюдаемых выходных переменных процесса ЭЛС, которые будут использоваться для контроля или управления формой проплава. Затем соответствующие друг другу значения геометрических параметров и компонент энергетического баланса, подставить в систему (16), которую предварительно разрешаем относительно энергетической яркости стенки.

Из каждого уравнения находим значения q_n , усредняем их и, подставляя обратно в (16), получаем уже настроенную оценочную модель, которая адекватна данному конкретному процессу сварки в указанной области параметров формы проплава.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно отметить следующее.

1. Энергия электронного пучка в процессе ЭЛС расходуется на нагрев, плавление металла и излучение из кратера. Первые две составляющие отводятся в изделие вследствие теплопроводности, а третья – за счет обратных электронов, парового и теплового потоков во внешнюю среду. Таким образом, энергетический баланс пучка в парогазовом кратере можно представить двумя компонентами: поглощаемой изделием и излучаемой наружу, которые определяются формой и величиной поверхности парогазового кратера. Это предполагает наличие интегральной связи между данными компонентами и формой кратера, задающего геометрические параметры формы проплава формируемого сварного шва.

2. Зависимость компонент энергетического баланса от формы парогазового кратера позволяет предложить методику для идентификации уравнений связи, которые можно использовать для оценки текущих параметров формы проплава по наблюдениям упомянутых компонент.

Для этого необходимо принять типовой вид формы канала и интегрированием установить искомую связь в виде системы нелинейных алгебраических уравнений. Затем линеаризовать полученные уравнения в локальной области параметров формы проплава на основе метода наименьших квадратов, разрешить их относительно последних и выполнить настройку данной оценочной модели на условия конкретной технологии ЭЛС, заключающуюся в экспериментальном определении энергетической яркости стенки парогазового кратера, которая входит в уравнения связи в виде неизвестного коэффициента.

Список литературы

1. Зуев И. В., Рыкалин Н. Н., Углов А. А. О распределении плотности тока по сечению электронного луча // Физика и химия обработки материалов. 1968. № 6. С. 5–12.
2. Ластовирия В. Н. Процесс электронно-лучевой сварки как объект управления формой провара // Сварочное производство. 1997. № 5. С. 2–5.
3. Электронно-лучевая технология: Пер. с нем. / З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер. – М.: Энергия, 1980. – 528 с.
4. Ерохин А. А., Резниченко В. Ф., Худышев А. Ф. Об эффективном коэффициенте полезного действия процесса проплавления при сварке электронным лучом // Физика и химия обработки материалов. 1970. № 3. С. 131–133.
5. Виноградов В. А. Возможность контроля и регулирования энерговложения в изделие при сварке концентрированными источниками нагрева с помощью оптических методов. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Сварочное производство. 1982. Вып. 3(9). С. 91–94.
6. Ланкин Ю.Н. Экспериментальное исследование эмиссии заряженных частиц и теплового излучения как параметров автоматического регулирования процесса электроннолучевой сварки. – Киев, 1982. – 31 с. (Препринт ИЭС-82-5).
7. Ластовирия В. Н., Бессонова Ю. Б. Расчет теплового потока, излучаемого из парогазового канала в случае кинжального проплавления электронным пучком // Физика и химия обработки материалов. 1998. № 6. С. 86–90.
8. Ластовирия В.Н. Оценка текущей глубины проплава по регистрируемым переменным процесса проплавления при ЭЛС / Сварка и смежные технологии // Сб. докладов ВНТК. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. С. 388–392.