

УДК 519.86-87.001.57

Тепловая эффективность формирования шва при электронно-лучевой и трехфазной сварках

Ю. В. Мякишев*, М. К. Богословская

Проанализированы тепловые эффективности процессов сварки электронным лучом и давлением с позиций синергетики. Установлен новый экспериментальный факт мультипликативной природы процесса нагрева вещества концентрационными потоками энергии.

Ключевые слова: тепловая эффективность, структура, электронно-лучевая и твердофазная сварки, термический коэффициент полезного действия.

Обобщенный подход к оценке энергетических затрат таких процессов, как сварки электронным лучом (сварка плавлением) и давлением может быть реализован через понятие термического коэффициента полезного действия (КПД), которое для электронно-лучевой сварки было введено Н. Н. Рыкалиным в 50-х гг. XX в.

В перечисленных процессах сварки всегда присутствуют тепловая и силовая составляющие. В случае сварки электронным лучом расплавленный металл (тепловая составляющая) перемещается с передней стенки канала проплавления на заднюю стенку давлением пара (силовая составляющая). При сварке давлением свариваемые детали нагреваются (тепловая составляющая) и сжимаются прикладываемым напряжением (силовая составляющая). Доли данных составляющих в указанных процессах различаются лишь количественно.

Известно, что в условиях движущегося электронно-луча термический КПД (по Н. Н. Рыкалину) определяется равенством:

$$\eta_T = (vFS_{пл})/q,$$

где v — скорость перемещения теплового источника, см/с; F — площадь поперечного сечения сварного шва,

см²; $S_{пл}$ — теплосодержание расплавленного металла, Дж/см³; q — подводимая (эффективная) мощность, Вт.

В работе [1] показано, что величина термического КПД существенно зависит не только от параметров q и v , но и от глубины канала проплавления H , см. Кроме того оказалось, что зависимость КПД от параметра $\alpha = H/B$, где B — ширина верхней кромки шва, см, для стали марки 12X18H10T представляет собой кривую с максимумом в единственной точке. Следовательно, можно сделать вывод о факте экспериментального подтверждения явления самоорганизации процесса проплавления и, соответственно, возникает задача, связанная со структурой термического КПД, или в более общем виде, со структурой процесса нагрева. В работе [2] показано, что данная структура является мультипликативной.

Введем безразмерные критерии в условиях движущего луча:

$$\alpha = \frac{H}{B}; \quad \gamma = \frac{BS_{пл}a}{q}; \quad \mu = \frac{vH}{a}; \quad \varepsilon = \frac{F}{H^2}, \quad (1)$$

где a — коэффициент температуропроводности, см²/с и получим:

$$\eta_T = \alpha\gamma\varepsilon. \quad (2)$$

Отметим, что в работе [3] критерии Н. Н. Рыкалина (Ry) и Г. Б. Христиансена (Ch) связаны с критериями

* MiakishevYV@mpei.ru

(1) и между собой непосредственно следующими соотношениями:

$$\mu = \alpha\gamma Ry; \quad Ch = \mu^2 \varepsilon; \quad Ch = Ry\mu\varepsilon\gamma,$$

причем $Ry = \frac{qv}{a^2 S_{\text{пл}}}$; $Ch = \frac{v^2 F}{a^2}$

Таким образом, в соотношения, определяющие введенные критерии, а вместе с ними и термический КПД, входят величины трех типов: теплофизические характеристики материала: $S_{\text{пл}}$ и a ; геометрические характеристики канала проплавления: F , H , B , а также управляющие параметры: v и q , с помощью которых можно воздействовать на процесс проплавления. Кроме того, полученное разложение η_r на множители показывает, что термический КПД имеет четко выраженную мультипликативную структуру.

Рассмотрим пример. Значения $\beta = \mu\varepsilon = vF/aH$, $\alpha = H/B$ (см. (2)) для процесса проплавления стали 12Х18Н10Т движущимся электронным лучом со скоростью $v = 0,78$ см/с при различных значениях q приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения β , α , q для процесса проплавления стали

$q, \text{Вт}$	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
α	1,01	2,21	3,27	5,00	6,11	8,02	10,53
β	1,43	1,37	1,53	1,43	1,68	1,52	1,36

Ясно, что α и β зависят от q . Исключая q , получим зависимость $\beta(\alpha)$. Эта зависимость чрезвычайно интересна. При $\alpha < 6$ она выглядит как квазипериодическая, а при $\alpha > 6$ — монотонно убывающая функция. Отсюда следует, что при $\alpha > 6$ динамическая система, одной из характеристик которой является β , находится в устойчивом стационарном состоянии. Если $\alpha < 6$, то в системе возникают колебания и она становится неустойчивой. При этом возможно происходит бифуркация Андронова–Хопфа, т.е. из устойчивого стационарного состояния рождается предельный цикл. Родившийся при такой бифуркации предельный цикл не обязательно устойчив. Отметим, что бифуркационное значение критерия $\alpha = 6$ соответствует точке максимума на кривой $\eta_r(\alpha)$. Таким образом, между фактом наличия максимума на кривой $\eta_r(\alpha)$ и существованием точки бифуркации на кривой $\beta(\alpha)$ имеется глубокая взаимосвязь.

Таким образом, если управляющим параметром является q ($v = \text{const}$), то в окрестности точки $\alpha = 6$ отчетливо наблюдается неустойчивость процесса, а при переходе через нее — смена механизма процесса.

Аналогичный характер поведения рассматриваемой динамической системы наблюдается и в случае, когда управляющим параметром является v (q при этом

фиксировано). Однако происходит это вблизи другого значения a , а именно в окрестности точки $\alpha = 7,5$.

В условиях воздействия на металл неподвижным электронным лучом термический КПД определяется равенством:

$$\eta_r = \frac{HFS_{\text{пл}}}{tq},$$

где t — время действия электронного луча. Введя безразмерные критерии:

$$\alpha = \frac{H}{B}; \quad \gamma = \frac{BS_{\text{пл}}a}{q}; \quad \delta = \frac{F}{ta},$$

получим:

$$\eta_r = \alpha\gamma\delta.$$

Таким образом, и в случае неподвижного электронного луча структура термического КПД является мультипликативной. Рассматривая процесс проплавления сплава алюминия Д-16 неподвижным электронным лучом с подводимой (эффективной) мощностью $q = 100$ Вт при различных значениях t , получим табл. 2:

Таблица 2

$t, \text{с}$	1	2	3	4	5
α	1,37	1,55	1,6	1,71	1,83
β	0,055	0,25	0,23	0,25	0,24

Зависимость $\delta = \delta(\alpha)$, полученная благодаря использованию таблицы, может быть интерпретирована следующим образом. При $\alpha < 1,55$ эта зависимость является монотонно возрастающей функцией, а при $\alpha > 1,55$ наблюдаются затухающие колебания. Отсюда, по аналогии с предыдущим примером, вытекает, что при $\alpha < 1,55$ динамическая система находится в устойчивом стационарном состоянии, а при $\alpha > 1,55$ в динамической системе возникают затухающие колебания. Следовательно, $\alpha = 1,55$ соответствует точке бифуркации и, кроме того, именно при этом значении достигается максимум на кривой $\eta_r(\alpha)$. Таким образом, мультипликативная структура термического КПД позволила обнаружить различие механизмов возникновения колебаний в случае движущегося и неподвижного электронных лучей.

Прежде чем вводить понятие термического КПД при сварке давлением, отметим, что многочисленные исследователи (Кочергин К. А., Зуев И. В., Углов А. А., Конюшков Г. В., Мусин Р. А., Трифонова К. А. и др.) показали, что сварка давлением на начальном этапе является сваркой плавлением по локальным очагам взаимодействия и поэтому термический КПД можно определить следующим образом:

$$\eta_r = \frac{T_{\text{пл}}}{T_{\text{св}}} \frac{a\rho}{P\dot{\varepsilon}h}, \tag{3}$$

где $T_{пл}$, $T_{св}$ — температуры плавления металла и сварки, соответственно; ρ — плотность материала, г/см³; $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации; P — давление в контанте. Учитывая, что $P = P_0/S$, где P_0 — заданное давление сварки, кгс; S — средняя площадь очага взаимодействия; $\dot{\epsilon} = a/h^2$, где h — средняя высота микровыступов (ширина зазора между соединяемыми металлами), равенство (3) можно представить в виде:

$$\eta_T = \frac{T_{пл}}{T_{св}} \frac{\rho h S}{P_0}.$$

Таким образом, добавив обозначения безразмерных множителей $\varphi = \frac{T_{пл}}{T_{св}}$, $\psi = \frac{\rho h S}{P_0}$, получим:

$$\eta_T = \varphi \psi.$$

Отсюда следует, что и в случае сварки давлением на начальном этапе термический КПД также имеет мультипликативную структуру, причем φ является тепловой, а ψ — силовой и геометрической составляющими.

Расчет по формуле (3) для Al и Ti показал, что термический КПД равен соответственно 0,71 и 0,43. Эти результаты практически совпадают с известными значениями, полученными Зуевым И. В. в 1995 г.

Литература

1. Зуев И.В., Родякина Р.В. Тепловая эффективность процесса электронно-лучевого нагрева // Доклады АН. 1994. Т. 339. № 3. С. 316 — 318.
2. Зуев И.В., Мякишев Ю.В. О мультипликативной структуре процесса нагрева материалов концентрированными потоками энергии // Синергетика — 96: тр. симпозиума. Ч. II. Самоорганизующиеся технологии получения, обработки и сварки материалов. М.: РАН, Госкомвуз РФ, ЦРДС, 1996. С. 107 — 109.
3. Fuerchbach P.W. Measurement and prediction of energy transfer efficiency in laser beam welding // J. Welding. 1996. V. 75. N 1. P. 24.

Статья поступила в редакцию 23.10.2015