



ПРИМЕНЕНИЕ СКАНИРУЮЩЕГО СВАРОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ КОРНЕВЫХ ДЕФЕКТОВ НА СТАЛЯХ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. О. Е. Патона НАН Украины)

Исследовано влияние возмущений поверхности жидкого металла, находящегося на передней стенке парогазового канала, на формирование корневых дефектов при электронно-лучевой сварке стали большой толщины. Показано, что с помощью продольной развертки электронного луча можно уменьшить возмущения поверхности расплава на передней стенке канала и сократить количество корневых дефектов в сварных швах.

Ключевые слова: стали, большая толщина, электронно-лучевая сварка, парогазовый канал, корневые дефекты, пики проплавления, сканирование электронным лучом, капиллярные волны

Как известно [1], корневые дефекты типа холодный затвор, образующиеся при электронно-лучевой сварке (ЭЛС) в сталях большой толщины, являются концентраторами напряжений в швах и негативно влияют на механические свойства сварных соединений. Наличие корневых дефектов на участках вывода кратера кольцевых соединений, например роторов газовых и паровых турбин, сосудов высокого давления, запорной арматуры, снижает несущее сечение соединений, что является недопустимым для изделий ответственного назначения [2]. Для устранения корневых дефектов в сварных соединениях необходимо дальнейшее изучение природы их образования при ЭЛС сталей большой толщины и определение тех параметров сварочного процесса, которые являются критическими для формирования корневой части шва.

Цель данной работы — определение влияния отражения электронного пучка от возмущений поверхности жидкого металла на образование корневых дефектов в глубоких парогазовых каналах. В литературе неоднократно поднимался вопрос о механизме формирования корневой части сварных соединений при ЭЛС металлов малой и средней толщины, однако четкого представления об особенностях этого механизма в швах глубиной более 100 мм сформулировано не было. Об этом свидетельствует тот факт, что замыкание кольцевых стыков и вывод кратера при ЭЛС толстостенных конструкций все еще остается сложной задачей [3].

В работе [4] показано, что при сварке равномерно движущимся электронным лучом расплавленный металл в парогазовом канале совершает колебания на собственной частоте. Причем в данном процессе преобладает самая низкочастотная из разрешенных мод колебаний расплава, имеющая максимальную амплитуду. Одним из проявлений подобных колебаний являются наблюдаемые в ходе сварочного процесса периодические выносы расплава из парогазового канала, вследствие которых затем на поверхности шва образуются структуры

в виде крупных валиков. В данной статье рассматривается другое проявление колебаний расплава в парогазовом канале — образование в сварных швах пиков проплавления и связанных с ними корневых дефектов.

Результаты проведенных ранее исследований показали, что передние стенки глубоких каналов в установившемся состоянии имеют на половине глубины проплавления наклон в $1...2^\circ$ [5]. Столь малые углы встречи электронного пучка с поверхностью тонкого слоя расплавленного металла влияют не только на процессы плавления и испарения металла, но и на отражение первичных электронов [6] и изменение траектории их движения в парогазовом канале. Это приводит к тому, что мощность электронного пучка, достигающего дна канала, меняется во времени в ходе сварочного процесса, причем время ее изменения зависит от периода собственных колебаний расплава в канале. В свою очередь колебания мощности электронного пучка, попадающего в корень канала, могут вызывать локальные изменения глубины сварного шва, что обычно проявляется в виде острых пиков проплавления различных размеров. Известно, что достаточно большая амплитуда колебания глубины проплавления может способствовать образованию корневых дефектов. Одним из общепринятых положений о формировании корневых дефектов является то, что дефекты типа холодный затвор образуются вследствие быстрого застывания жидкого металла до его затекания и заполнения пиков проплавления [1].

Таким образом, для уменьшения вероятности появления корневых дефектов в сварных соединениях необходимо, чтобы, с одной стороны, амплитуда колебаний локальной глубины проплавления была как можно меньшей, а с другой, — частота появления пиков проплавления была более низкой при данных параметрах сварочного процесса.

Известно, что при сварочном процессе в результате взаимодействия электронного пучка с передней стенкой парогазового канала на поверхность жидкого металла действует сила реакции отдачи, возникающая вследствие испарения металла с поверхности расплава внутри канала [7]. В работе

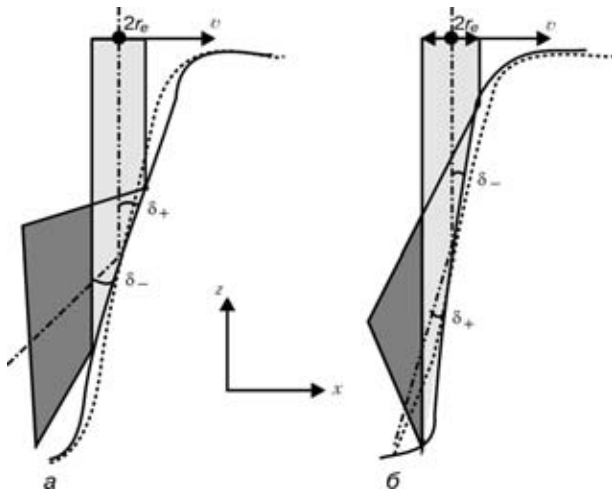


Рис. 1. Увеличение эффективного угла взаимодействия электронного пучка с передней стенкой δ_+ (а) и его уменьшение δ_- (б) в ходе сварочного процесса: r_e — радиус сосредоточенности пучка; v — скорость сварки; пунктирной линией обозначена невозмущенная поверхность расплава; штриховой — примерная зона рассеяния центральной части электронного пучка

[4] показано, что при ЭЛС, осуществляемой равномерно движущимся электронным пучком, давление отдачи слабо меняется во времени, а колебания расплава, возникающие на фоне общего движения жидкого металла по стенкам пароголового канала, происходят на собственных частотах. Причем вследствие симметрии задачи, связанной с направлением движения электронного луча, возбуждается первая мода колебаний $m = 1$, соответствующая продольным (вдоль направления сварки) смещениям расплава. Частота ω_1 первой моды колебаний расплава в пароголовом канале определяется согласно дисперсионному соотношению из работы [4]

$$\omega_1^2 = C_1 \frac{\sigma}{\rho} k^3, \quad (1)$$

где C_1 — коэффициент, зависящий от размеров пароголового канала; σ — коэффициент поверхностного натяжения; ρ — плотность расплавленного металла; k — волновой вектор колебаний.

Рассмотрим колебания поверхности расплава, возникающие на передней стенке пароголового канала. Очевидно, что наибольшую амплитуду будут иметь самые низкочастотные колебания расплава, длина волны которых приблизительно равна глубине проплавления — $\lambda \cong H$ [4]. При таких колебаниях эффективный угол взаимодействия электронного луча с поверхностью расплава на передней стенке будет меняться в ходе сварочного процесса с частотой, равной частоте собственных колебаний расплава в пароголовом канале. Поскольку минимальный угол наклона передней стенки канала при сварке металлов большой толщины не превышает 2° , интенсивность отраженного от передней стенки электронного пучка будет приблизительно на 1,5 порядка больше, чем при нормальном падении пучка на поверхность металла [6]. При этом вследствие малости угла падения электронного пучка на переднюю стенку канала даже небольшие изменения угла δ могут вызывать

значительные изменения интенсивности отраженного пучка.

На рис. 1 представлены возмущения поверхности расплава в соответствии с увеличением δ_+ и уменьшением δ_- эффективного угла падения электронного пучка на переднюю стенку. Из рисунка хорошо видно, что при увеличении эффективного угла $\delta_+ > \delta$ отраженные электроны попадают на заднюю стенку канала (рис. 1, а), в то время как при уменьшении угла $\delta_- < \delta$ значительная часть электронов достигает его корня (рис. 1, б). Очевидно, что непосредственное попадание части электронов в корень канала приводит к выделению тепловой энергии на дне канала, а следовательно, и к увеличению локальной глубины проплавления. Таким образом, глубина проплавления меняется в ходе сварочного процесса с частотой, равной частоте собственных колебаний расплава в канале.

Подобные возмущения поверхности жидкого металла в канале, несомненно, оказывают большое влияние на формирование корневых дефектов, поскольку в первом случае (рис. 1, а) происходит экранирование нижней части канала, а во втором, — (рис. 1, б) большая часть энергии отраженного электронного пучка попадает в корень пароголового канала.

Очевидно, что уменьшение мощности электронного пучка, достигающего корня канала, будет приводить к снижению амплитуды пиков проплавления в сварном шве. Этого можно добиться, например, путем использования сканирующего электронного луча, как показано в работе [3]. При этом частота развертки электронного луча должна быть достаточно большой, чтобы скорость движения электронного пучка не оказывала влияния на тепловые процессы, происходящие в пароголовом канале.

Иными словами, необходимо, чтобы электронный пучок в процессе сканирования не вызывал существенных изменений при распределении температуры в канале. Далее приведем оценки этих величин.

Как известно, скорость распространения тепла в среде зависит от ее теплопроводности. В свою очередь скорость изменения температуры зависит от коэффициента температуропроводности материала

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho c},$$

где λ — коэффициент теплопроводности; c — удельная теплоемкость материала. Для стали $\lambda = 0,8 \text{ Вт}/(\text{см}\cdot\text{К})$, $\rho = 7,8 \text{ г}/\text{см}^3$ и $c = 0,44 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot\text{К})$. Отсюда коэффициент температуропроводности составляет $\kappa = 0,8 / (7,8 \cdot 0,44) \approx 0,23 \text{ см}^2/\text{с}$. Поскольку градиенты температуры вдоль глубины пароголового канала гораздо меньше градиентов температуры поперек канала, характерным масштабом изменения температуры в ходе сварочного процесса может служить радиус пароголового канала $R \cong 2 \dots 3 \text{ мм}$. В этом случае скорость распространения изменений температуры составит $v_T \cong \kappa / R \cong 1 \text{ см}/\text{с}$. При частоте развертки луча $f \cong 100 \text{ Гц}$



и амплитуде $A \cong 1$ мм скорость сканирования равна $v_s \cong 4Af \cong 40$ см/с. Таким образом, видно, что условие $v_s \gg v_T$ выполняется с хорошей точностью. Следовательно, меняя частоту и амплитуду развертки электронного луча, можно регулировать поступление дополнительной энергии на дно парогазового канала и тем самым воздействовать на формирование шва в корневой его части.

На рис. 2 показано распределение плотности мощности электронного пучка q вдоль оси сварки x при использовании продольной развертки пучка в виде симметричной пики с амплитудой $A = 0, 1, 2$ и 4 радиуса r_e сосредоточенности пучка. Статический электронный пучок, изображенный на рис. 2, имеет гауссово распределение плотности мощности, где q_0 обозначает полную мощность пучка. Из рисунка видно, что с ростом амплитуды сканирования происходит перераспределение мощности электронного пучка вдоль направления сканирования, и он перестает быть гауссовым. Наряду с этим уменьшается и максимальная плотность мощности электронного пучка, которая при $A = 4r_e$ составляет приблизительно 25 % максимальной мощности статического электронного пучка.

Отсюда можно сделать вывод, что при использовании развертки луча мощность, рассеиваемая на возмущениях передней стенки канала, также уменьшается. Это неизменно должно повлечь за собой снижение амплитуды пиков проплавления в корне канала, вследствие чего также уменьшается вероятность образования корневых дефектов в сварных швах.

Однако частота используемой развертки электронного пучка не может быть слишком большой, поскольку при высокой частоте колебаний расплава ($\omega/2\pi \gg 1$ Гц) усредненный по периоду коэффициент затухания γ определяется по следующей зависимости:

$$\gamma = 2\nu k^2 \cong \omega^{4/3},$$

где ν — динамическая вязкость жидкости [8]. Подобная зависимость обеспечивает быстрое за-

тухание высокочастотных колебаний расплава в канале. При низкой частоте колебаний γ в основном определяется потерями вблизи стенок канала, которые зависят от частоты — $\gamma \cong \omega^{1/2}$ [8]. Подставив в это выражение формулу (1), можно получить следующую зависимость коэффициента затухания γ от волнового вектора колебаний k для первой моды низкочастотных колебаний расплава в канале

$$\gamma(k) \cong \omega^{1/2} \cong (C_1(k) k^3)^{1/4}, \quad (2)$$

где коэффициент C_1 определяется по формуле из работы [4]

$$C_1(k) = \frac{[K'_1(kR)I'_1(kR_2) - I'_1(kR)K'_1(kR_2)]}{[I'_1(kR)K'_1(kR_2) - K'_1(kR)I'_1(kR_2)]}, \quad (3)$$

здесь I_1 и K_1 — соответственно модифицированные функции Бесселя 1- и 2-го рода; I'_1 и K'_1 — соответственно производные от этих функций; R и R_2 — соответственно внутренний и внешний радиусы канала.

Поскольку в длинноволновой области спектра колебаний расплава в канале ($k < 1/R$) коэффициент C_1 обратно пропорционален волновому вектору $C_1 < k^{-1}$ [4], можно сделать вывод, что γ при низкой частоте затухания зависит от k гораздо меньше ($\gamma \cong k^{1/2}$), чем при высокой частоте, когда $\gamma \cong k^2$.

Одним из ключевых факторов, влияющих на гидродинамическую стабильность парогазового канала в ходе сварочного процесса, является амплитуда колебаний расплавленного металла на стенках канала. Как известно [9], наибольшую амплитуду имеют колебания, возбуждаемые на резонансных (собственных) частотах системы. Вблизи резонанса амплитуда вынужденных колебаний обратно пропорциональна частоте развертки луча и затуханию $A \cong (\omega\gamma)^{-1}$.

В работе [4] показано, что спектр собственных колебаний расплава в канале имеет дискретную структуру, причем интервал между соседними собственными частотами уменьшается с увеличением глубины проплавления. С помощью формул (2) и (3) оценим коэффициенты затухания γ_{Fe} и амплитуды A для первой моды колебаний расплава железа на примере парогазового канала глубиной $H = 120$ мм с внутренним $R = 2$ мм и внешним $R_2 = 3$ мм радиусами. Результаты оценки для гармоник колебаний с номерами $n = 1 \dots 128$ приведены в таблице, где k_n — волновой вектор n -й гармоники колебаний; f_n — соответствующая ей частота колебаний; ω_n — собственная круговая частота; A_n — амплитуда колебаний, отнесенная к амплитуде первой гармоники A_1 .

Как видно из таблицы, при увеличении номера гармоники n , а следовательно, волнового вектора k_n , частота собственных колебаний ω_n возрастает сверхлинейно — $\omega_n \cong n^p$ ($p > 1$). В час-

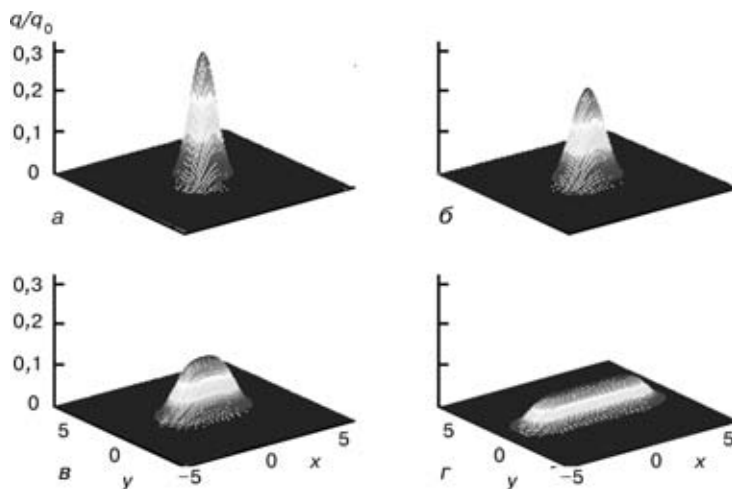


Рис. 2. Распределение плотности мощности электронного пучка q при использовании продольной развертки пучка вдоль оси x в виде симметричной пики с различной амплитудой радиуса r_e сосредоточенности пучка: а — $A = 0$; б — $1r_e$; в — $2r_e$; г — $4r_e$



Параметры колебаний расплава железа в парогазовом канале ($H = 120$ мм, $R = 2$ мм, $R_2 = 3$ мм)

n	$R_n, \text{см}^{-1}$	$f_n, \text{Гц}$	$\omega_n, \text{рад/с}$	$\gamma_{\text{Fe}}, \text{с}^{-1}$	A_n/A_1
1	0,131	0,37	2,33	0,0003	1,0
2	0,393	1,12	7,01	0,0031	$1,9 \cdot 10^{-1}$
4	0,916	2,66	16,7	0,0168	$5,1 \cdot 10^{-2}$
8	1,964	6,14	38,6	0,0771	$1,4 \cdot 10^{-2}$
16	4,058	15,80	99,4	0,3293	$3,2 \cdot 10^{-3}$
32	8,247	47,60	299,0	1,3602	$5,4 \cdot 10^{-4}$
64	16,620	145,00	910,0	5,5273	$7,9 \cdot 10^{-5}$
128	33,380	409,00	2569,0	22,284	$1,1 \cdot 10^{-5}$

тности, для высоких гармоник колебаний $n \gg 1$ имеем $p \cong 3/2$. Ввиду того, что с ростом волнового вектора k коэффициент затухания γ увеличивается согласно формуле (2) — $\gamma \cong n^{3/4}$, амплитуда колебаний убывает по степенному закону $A_n \cong (\omega_n \gamma)^{-1} \cong n^{-(p+3/4)}$, который для $n \gg 1$ принимает вид $A_n \cong n^{-9/4}$. Из таблицы видно, что при увеличении номера гармоники n в 2 раза амплитуда вынужденных колебаний уменьшается в $2^{9/4} \cong 5$ раз при приведенном диапазоне частот.

Как отмечалось выше, спектр собственных колебаний расплава в парогазовом канале дискретен, причем с увеличением частоты ω плотность спектра уменьшается. Так, согласно формуле (1), для парогазового канала глубиной $H = 120$ мм расстояние между соседними собственными частотами, равными 1 Гц, составляет $\Delta\omega/2\pi < 1$ Гц, а при частоте 512 Гц — $\Delta\omega/2\pi \cong 6$ Гц. Вследствие высокой плотности спектра колебаний расплава в каналах большой глубины ($H \geq 80$ мм) становится возможным резонансное возбуждение собственной частоты при использовании развертки электронного луча в субгерцовом и герцовом ($f \leq 10$ Гц) диапазонах, где затухание мало — $\gamma \ll 1$ (таблица). Резонансные колебания расплава в парогазовом канале проявляются в экспериментах в виде разбрызгивания жидкого металла из канала при ЭЛС сканирующим электронным лучом. Очевидно, что подобные резонансные явления негативно сказываются на качестве сварных швов и их следует избегать при выборе частоты развертки электронного луча. Этого можно достичь путем использования сканирующего электронного луча на более высоких частотах ($f > 100$ Гц), где затухание уже становится существенным — $\gamma > 1$.

Таким образом, при сварке металлов большой толщины использование продольной развертки электронного луча на частотах, выше некоторого верхнего предельного значения $f_{\text{п}}$, представляется нецелесообразным, так как на частотах $f > f_{\text{п}}$ значение амплитуды вынужденных колебаний будет ничтожно малым (таблица), а влияние развертки электронного луча на колебательные процессы в парогазовом канале несущественным. Так, при ЭЛС низколегированных сталей толщиной 100 мм и более верхний предел частоты составляет $f_{\text{п}} \cong 200$ Гц. Поэтому оптимальная частота развертки электронного луча при сварке стали большой тол-



Рис. 3. Продольный макрошлиф образца из низколегированной стали 12CrMoV, выполненный равномерно движущимся со скоростью $v = 5$ мм/с электронным лучом (в нижней части шва видны пики глубины проплавления и корневые дефекты)

щины должна находиться в диапазоне частот $f = 100 \dots 200$ Гц.

На рис. 3 в виде острых пиков различной глубины представлены колебания глубины проплавления низколегированной стали 12CrMoV при ЭЛС электронным пучком со скоростью $v = 5$ мм/с. Мощность пучка составляла $P = 42$ кВт ($U = 60$ кВ, $I = 0,7$ А). Для исследования формы передней стенки канала образец не был проварен по всей длине; для этого электронный пучок быстро выключался в течение 1 мс. На рисунке в верхней части пиков проплавления хорошо видны следы затекания расплавленного металла, а в нижней части — корневые дефекты в виде темных полостей различного размера.

Зная скорость сварки, можно определить частоту пиков проплавления, изображенных на рис. 3. В работе [4] показано, что спектр собственных колебаний жидкого металла в парогазовом канале является дискретным. Поэтому колебания расплава могут осуществляться не на одной, а на нескольких частотах. Из всех частот собственных колебаний расплава наибольшую амплитуду будет иметь наименьшая разрешенная частота (первая гармоника), значения которой определяется по формуле (1). Однако не исключено, что рассеяние электронного пучка на следующей, более высокой частоте второй гармоники, также внесет вклад в образование пиков проплавления. Поскольку вторая гармоника имеет меньшую амплитуду, то и в связанных с ней пиках проплавления также будет меньшая глубина. В свою очередь, более высокие гармоники можно не учитывать, поскольку амплитуда собственных колебаний расплава падает обратно пропорционально частоте и коэффициенту затухания $A \cong 1/(\gamma\omega)$, что для третьей гармоники составляет значения, на порядок меньшие амплитуды первой гармоники $A_1/A_3 \cong 11$.

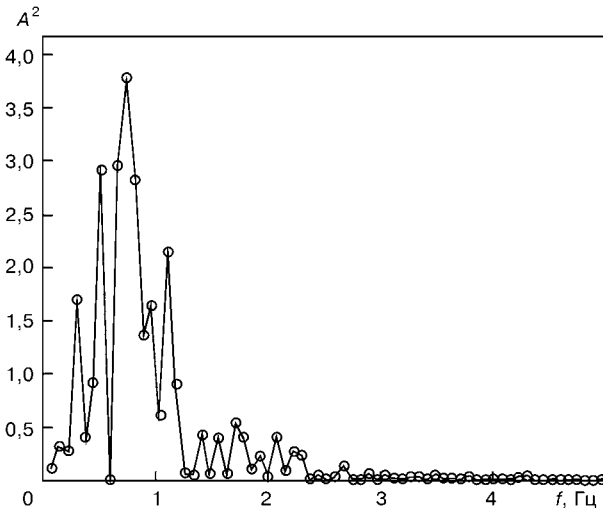


Рис. 4. Частотное распределение квадрата амплитуды Фурье-образа пиков проплавления, представленных на рис. 1

Проведем Фурье-анализ амплитуды пиков проплавления, изображенных на рис. 3. Для этого удобно воспользоваться стандартной математической процедурой быстрого дискретного Фурье-преобразования. На рис. 4 приведены результаты Фурье-анализа пиков проплавления в виде зависимости квадрата амплитуды Фурье-образа от частоты. Такая зависимость удобна тем, что она дает представление об интенсивности анализируемого процесса. Из рисунка видно, что в субгерцовой области спектра имеется ряд пиков большой интенсивности. Из всех пиков Фурье-образа, представленных на рис. 4, выделяется широкий пик максимальной амплитуды, положение которого соответствует частоте $f_{\max} \approx 0,74$ Гц. Это означает, что основное рассеяние мощности электронного пучка происходило именно на этой частоте.

В связи с изложенным выше представляет интерес сравнение частоты образования пиков глубины проплавления (рис. 3) с теоретическим значением наименьшей собственной частоты колебаний расплава f_1 в парогазовом канале

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{C_1 \frac{\sigma}{\rho} k^3}.$$

Здесь коэффициент C_1 определяется по формуле (3).

Для расчета C_1 необходимо знать значения глубины проплавления H , а также внутреннего R и внешнего R_2 радиусов парогазового канала. Значение R_2 и H можно определить довольно точно по макрошлифу сваренного образца. В виду того, что непосредственное измерение внутреннего радиуса канала на практике осуществимо трудно, значение R при расчете f_1 будет использоваться в качестве варьируемого параметра. Для образца из низколегированной стали 12CrMoV, представленного на рис. 3, по макрошлифам сварного шва установлено, что средняя глубина проплавления равнялась $H \approx 110$ мм, а значение внешнего радиуса на половине глубины проплавления составляло $R_2 \approx 2$ мм. Поскольку при малых значениях безразмерного параметра kR ($kR \ll 1$) значение коэф-

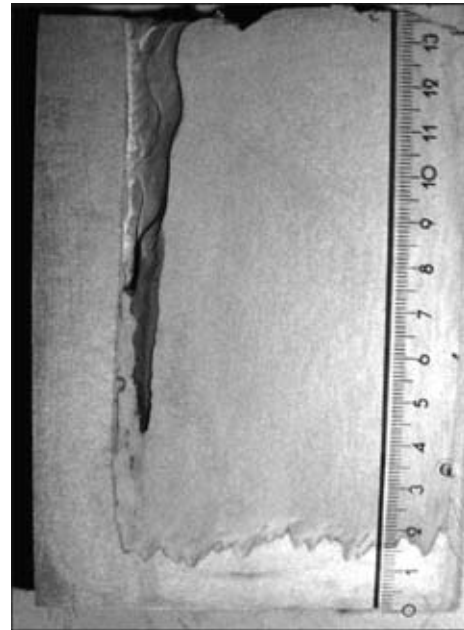


Рис. 5. Продольный макрошлиф образца из низколегированной стали 12CrMoV, полученного с применением продольной развертки электронного луча при $f = 133$ Гц и $A = 3$ мм (корневые дефекты в сварном шве отсутствуют)

фициента C_1 уменьшается обратно пропорционально kR , а внутренний радиус канала не может превышать радиус сосредоточенности r_e электронного пучка, то можно получить верхнюю оценку частоты первой гармоники собственных колебаний расплава f_1 . Так как радиус сосредоточенности электронного пучка r_e в данном эксперименте составлял приблизительно 0,5 мм, а волновой вектор первой гармоники колебаний расплава был равен $k = \pi/2H \approx 0,14$ см⁻¹, то значение параметра kR должно превосходить $7 \cdot 10^{-3}$ ($kR \geq 7 \cdot 10^{-3}$). При этом коэффициент $C_1 < 129$, следовательно, частота f_1 не должна превышать 1,25 Гц:

$$f_1 \leq \frac{1}{2\pi} \sqrt{129 \frac{12000}{7,3} \left(\frac{\pi}{2 \cdot 11} \right)^3} \approx 1,25 \text{ [Гц]}. \quad (4)$$

Как видим, значение частоты образования пиков проплавления, полученное экспериментально, не превышает оценку по формуле (4) — $f_{\max} \approx 0,74 f_1 < 1,25$ Гц. Хорошее согласование экспериментальных данных с расчетными получается при внутреннем радиусе парогазового канала $R \approx 1$ мм. В этом случае значение частоты первой гармоники собственных колебаний расплава в парогазовом канале составит $f_1 \approx 0,73$ Гц, что практически совпадает с частотой колебания глубины проплавления $f_{\max} \approx 0,74$ Гц.

На рис. 5 изображен макрошлиф стального образца, выполненного при тех же параметрах, что и образец на рис. 3, но уже с применением продольной развертки луча в виде симметричной пилы с частотой $f = 133$ Гц и амплитудой $A = 3$ мм. Скорость сварки, как и в предыдущем случае, составляла 5 мм/с. В этих условиях колебания глубины проплавления имеют гораздо меньшую амплитуду по сравнению со сваркой статическим пучком. Радиус электронного пучка в фокальной



плоскости приблизительно равен $r_e \cong 0,5$ мм, что отвечает амплитуде сканирования $A \cong 6r_e$. Это означает, что в данном случае пиковая мощность пучка уменьшилась приблизительно в 6 раз по сравнению со статическим пучком (см. рис. 3), что вполне соответствует уменьшению амплитуды пиков проплавления на рис. 5. Кроме того, из рисунка видно, что при ЭЛС с применением развертки электронного луча количество корневых дефектов существенно уменьшилось. Это позволяет сделать вывод о целесообразности использования сканирующего электронного луча в диапазоне частот $f = 100...200$ Гц для устранения корневых дефектов при сварке сталей большой толщины.

Разумеется, точное значение частоты развертки электронного луча будет зависеть от глубины проплавления и должно подбираться для канала конкретной глубины отдельно. В данном эксперименте при скорости сварки 5 мм/с оптимальное значение частоты для канала глубиной 120 мм составило $f = 133$ Гц.

Выводы

1. Одним из факторов, влияющих на образование корневых дефектов, является отражение электронного пучка от колеблющейся поверхности жидкого металла, находящегося на передней стенке канала. Подобные колебания расплава приводят к тому, что мощность электронного пучка, достигающего дна парогазового канала, меняется в ходе сварочного процесса, что влечет за собой образование пиков проплавления в сварных соединениях. Анализ амплитуды пиков проплавления показал, что частота их появления в сварных швах с хорошей точностью совпадает с наименьшей частотой собственных колебаний расплава в парогазовом канале. Установлено, что вследствие малой ампли-

туды более высокие гармоники ($n > 2$) собственных колебаний расплава влияния на величину пиков проплавления (а следовательно, на формирование корневых дефектов) не оказывают.

2. Применение продольной (вдоль направления сварки) развертки электронного луча в виде симметричной пилы в диапазоне частот $f = 100...200$ Гц позволяет добиться уменьшения возмущений поверхности расплава на передней стенке канала, и, как следствие, существенного снижения амплитуды пиков проплавления и количества корневых дефектов в сварных швах глубиной 120 мм, полученных при ЭЛС низколегированных сталей со скоростью сварки 5 мм/с. Имеющиеся теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

1. Патон Б. Е., Лесков Г. И., Живаго Л. И. Специфика образования шва при электронно-лучевой сварке // Автомат. сварка. — 1976. — № 3. — С. 1–5.
2. Гейкин В. А., Пузанов С. Г. Электронно-лучевая сварка жаропрочных титановых и никелевых сплавов // Материаловедение. — 1997. — № 6–7. — С. 46–47.
3. Diltthey U., Dobner M. Elektronenstrahlschweißen von radialen Ringnahten an Bauteile grossen Wanddicke // Schweissen und Schneiden 93. — Dusseldorf: DVS-Verl., 1993. — S. 127–132.
4. Нестеренков В. М. Особенности капиллярных волн в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке металлов большой толщины // Автомат. сварка. — 2002. — № 4. — С. 8–13.
5. Нестеренков В. М. Исследование и разработка методов стабилизации сварочной ванны и повышения качества швов при электронно-лучевой сварке: Дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1989. — 199 с. — Машинопись.
6. Пинскер З. Г. Дифракция электронов. — М.: Изд. АН СССР, 1976. — 404 с.
7. Лесков Г. И., Трунов Е. Н., Живаго Л. И. Форма, размеры и устойчивость пародинамических каналов в металле при электронно-лучевой сварке // Автомат. сварка. — 1976. — № 6. — С. 13–17.
8. Ладау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1986. — 736 с.
9. Ладау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. — М.: Наука, 1988. — 216 с.

Influence of disturbances on liquid metal surface, which is on the front wall of the vapour-gas channel, on formation of root defects in electron beam welding of thick steel. It is shown, that application of longitudinal scanning of the electron beam allows decreasing the magnitude of disturbances of melt surface on the channel front wall and reducing the number of root defects in welds.

Поступила в редакцию 20.03.2003