

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР ПОВЕРХНОСТИ И ДАВЛЕНИЯ ПАРОВ В КАНАЛАХ ПРОПЛАВЛЕНИЯ

Р.Ю. Киреев, В.Р. Петренко, В.П. Чумарный

В статье рассматривается изменение температуры поверхности цилиндрического канала проплавления и давления, возникающее в нём при сварке сплавов вертикальным и горизонтальным электронными пучками. Приводится сравнительная оценка распределения температур и давлений для двух схем сварки

Ключевые слова: давление паров в парогазовом канале, гидростатическое давление столба жидкости

Результаты многочисленных исследований [1-8], посвященных анализу формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке, свидетельствуют о том, что температурные условия существования жидкого металла в канале проплавления определяют величину наиболее значимых сил, действующих на расплав – поверхностного натяжения жидкого металла и давления паров в парогазовом канале.

Известно [11], что при сварке деталей вертикальным электронным лучом максимальные значения температуры и давления паров относятся к корневой части сварочной ванны, постепенно снижаясь к поверхности шва. Применение горизонтального электронного при сварке со сквозным проплавлением позволяет видоизменить распределение давления паров в канале проплавления.

Поэтому, учитывая первостепенное влияние распределения температур и давлений в канале проплавления на гидродинамическую обстановку в сварочной ванне, что в конечном счете определяет качество формирования сварного соединения. Возникает необходимость сравнительной оценки этих важных параметров (распределения температур и давлений) для двух схем процесса ЭЛС.

Проведем анализ условий формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке с вертикальным и горизонтальным расположением пучка электронов, используя упрощенную модель подобно тому как это сделано в работах [3, 5, 7, 11, 12]. При квазистационарном состоянии канала полное давление на сварочную ванну складывается из давления потока электронов, давления отдачи тепловых и вторичных электронов, давления теплового и рентгеновского излучения и давления отдачи, вызываемого струей испаряющегося металла. Результирующая этих давлений уравновешивается действием сил поверхностного

натяжения и гидростатическим давлением столба жидкого металла. Оценка действующих на сварочную ванну при ЭЛС давлений выполненная авторами [3] показала, что суммарная величина давления пучка электронов, отдачи тепловых, вторичных электронов, теплового и рентгеновского излучения значительно меньше давления паров металла. Поэтому в качестве первого приближения для поверхности канала проплавления можно принять условие равновесия сил в соответствии с уравнением [12]:

$$P_{\Pi} = P_{\sigma} + P_g \quad (1)$$

где P_{Π} - давление паров в канале проплавления (Па);

P_{σ} - давление от действия сил поверхностного натяжения (Па);

P_g - гидростатическое давление столба жидкого металла.

Проведя расчеты применительно к никелевым сплавам, используем зависимость давления паров от температуры в соответствии с выражением, приведенным в [1]:

$$\lg P_{\Pi} = -A/T + Blg \cdot T + CT + D \quad (2)$$

где T – абсолютная температура (К);

$A=18000$, $D=10,294$ - константы в интервале температур $T_{\text{пл}} \dots T_{\text{кип}}$

Равновесие невесомой жидкости на границе с газом описывается уравнением Лапласа:

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения (Н/м);

R_1 , R_2 - главные радиусы кривизны поверхности (м); ΔP – разность давлений в данной точке поверхности, вызванная искривлением границы фаз (Па).

Коэффициент поверхностного натяжения металлов является функцией температуры. А так как температура различных участков поверхности сварочной ванны изменяется, то для расчета давления от действия сил поверхностного натяжения будем использовать выражение коэффициента поверхностного натяжения в виде [13]:

$$\sigma = \sigma_{n\ell} - \frac{d\sigma}{dT}(T - T_{n\ell}) \quad (4)$$

где $\sigma_{n\ell} = 1,6 \text{ Н/м}$ - коэффициент поверхностного натяжения при температуре

Киреев Роман Юрьевич – ВГТУ, аспирант, тел. 8-951-871-61-79

Петренко Владимир Романович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. +7(473) 278-38-91

Чумарный Владимир Петрович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8 (473) 246-40-67

плавления металла - $T_{пл}$; $\frac{d\sigma}{dT} = 0,98 \cdot 10^{-3}$ Н/(м град.) - изменение величины поверхностного натяжения при изменении температуры на 1 °С.

Если предположить, что при «кинжалном» проплавлении кратер представляет собой цилиндрический канал радиусом R и высотой δ равной толщине проплавляемого металла (а это является достаточно близким приближением к реальным формам проплавления металлов электронным лучом при $\delta > 10$ мм), то $R_2 \gg R_1$ и тогда:

$$P_g = \left[\sigma_{пл} - \frac{d\sigma}{dT} (T - T_{пл}) \right] \frac{1}{R} \quad (5)$$

Величина гидростатического давления столба жидкости плотностью ρ и высотой δ :

$$P_g = \rho g \delta \quad (6)$$

Координата δ для случая сварки вертикальным лучом определяется положением сечения канала относительно поверхности металла. При сварке горизонтальным лучом за эту координату принимался характерный размер, равный расстоянию от осевого сечения канала на середине проплавляемой толщины до его основания.

В работах [9, 14], где плотность определяли в некотором температурном диапазоне, дается линейная зависимость плотности жидкого металла от температуры:

для никеля

$$\rho = 7.65 \cdot 10^{-3} - 0.075 \cdot (T - 1453),$$

для титана

$$\rho = 4.12 \cdot 10^{-3} - 0.42 \cdot (T - 1671), \quad (7)$$

для алюминия

$$\rho = 2.7 \cdot 10^{-3} - 0.07 \cdot (T - 660),$$

Учитывая (2), (5), (6) и (7) запишем:

для никеля:

$$10^{\left(\frac{-A}{T} + B \lg T + CT + D \right)} = \left[\sigma_{пл} - \frac{d\sigma}{dT} (T - T_{пл}) \right] \cdot \frac{1}{R} + \\ + [7.65 \cdot 10^{-3} - 0.075 \cdot (T - 1453)] \cdot g \delta,$$

для титана:

$$10^{\left(\frac{-A}{T} + B \lg T + CT + D \right)} = \left[\sigma_{пл} - \frac{d\sigma}{dT} (T - T_{пл}) \right] \cdot \frac{1}{R} + \\ + [4.12 \cdot 10^{-3} - 0.42 \cdot (T - 1671)] \cdot g \delta,$$

для алюминия:

$$10^{\left(\frac{-A}{T} + B \lg T + CT + D \right)} = \left[\sigma_{пл} - \frac{d\sigma}{dT} (T - T_{пл}) \right] \cdot \frac{1}{R} + \\ + [2.7 \cdot 10^{-3} - 0.07 \cdot (T - 660)] \cdot g \delta,$$

Результаты решения этих трансцендентных уравнений представлены на графиках функций $T = f(R)$ и $P_n = f(R)$ в цилиндрическом канале для разных толщин металлов, сваренных вертикальным и горизонтальным пучками электронов рис. 1, 3, 5 (зависимость $T = f(R)$) и рис. 2, 4, 6 (зависимость $P_n = f(R)$).

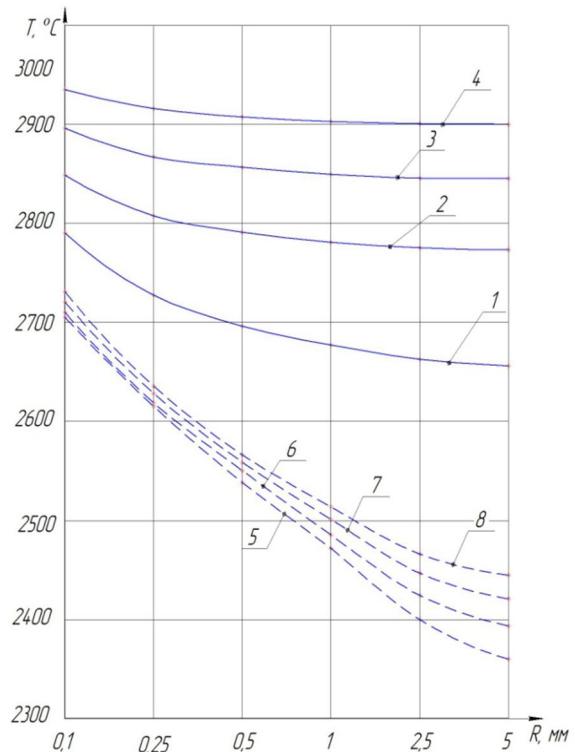


Рис. 1. Изменение температуры поверхности цилиндрического канала проплавления при сварке никеля (1-4) вертикальным и (5-8) горизонтальным электронными пучками. Толщина металлов: 1, 6 – 50 мм; 2, 7 – 100 мм; 3, 8 – 150 мм; 4 – 200 мм; 5 – 20 мм.

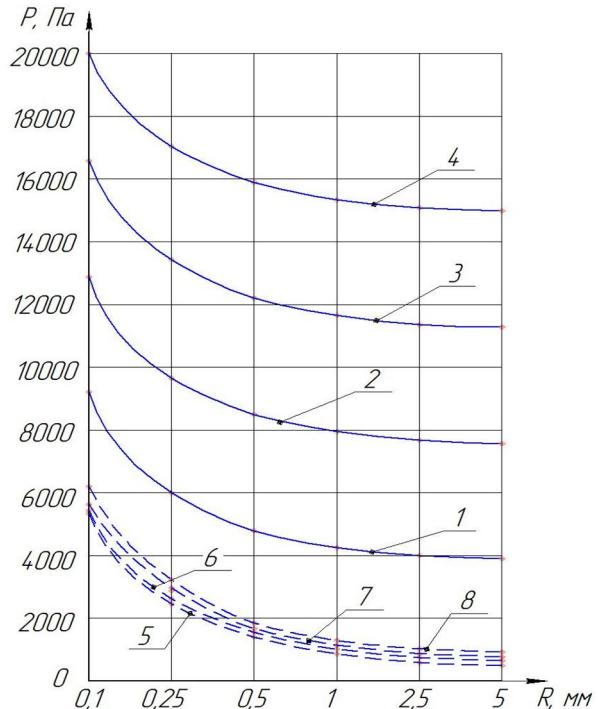


Рис. 2. Зависимость давления паров в цилиндрическом канале проплавления при сварке никеля (1-4) вертикальным и (5-8) горизонтальным электронными пучками. Толщина металлов: 1, 6 – 50 мм; 2, 7 – 100 мм; 3, 8 – 150 мм; 4 – 200 мм; 5 – 20 мм.

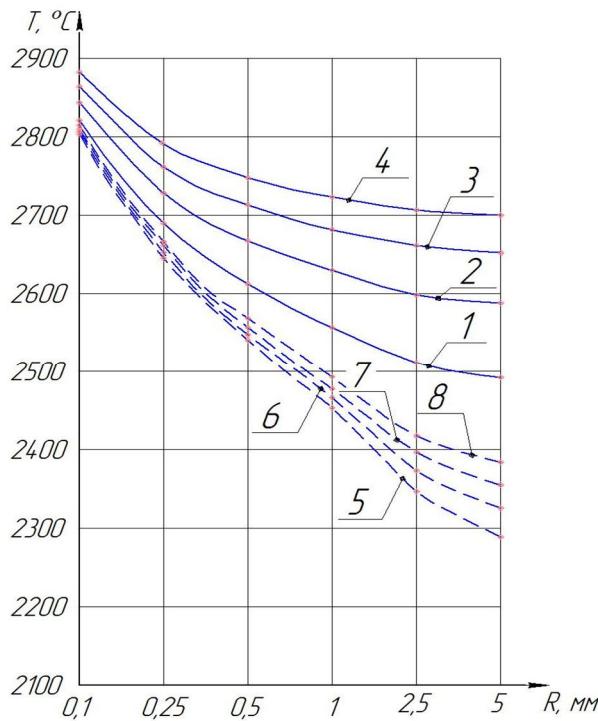


Рис.3. Изменение температуры поверхности цилиндрического канала проплавления при сварке титана (1-4) вертикальным и (5-8) горизонтальным электронными пучками. Толщина металлов: 1, 6 – 50 мм; 2, 7 – 100 мм; 3, 8 – 150 мм; 4 – 200 мм; 5 – 20 мм.

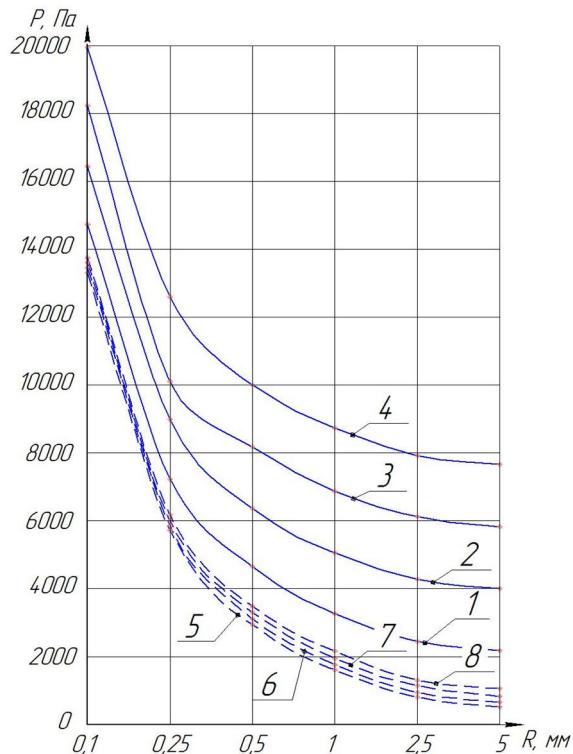


Рис. 4. Зависимость давления паров в цилиндрическом канале проплавления при сварке титана (1-4) вертикальным и (5-8) горизонтальным электронными пучками. Толщина металлов: 1, 6 – 50 мм; 2, 7 – 100 мм; 3, 8 – 150 мм; 4 – 200 мм; 5 – 20 мм.

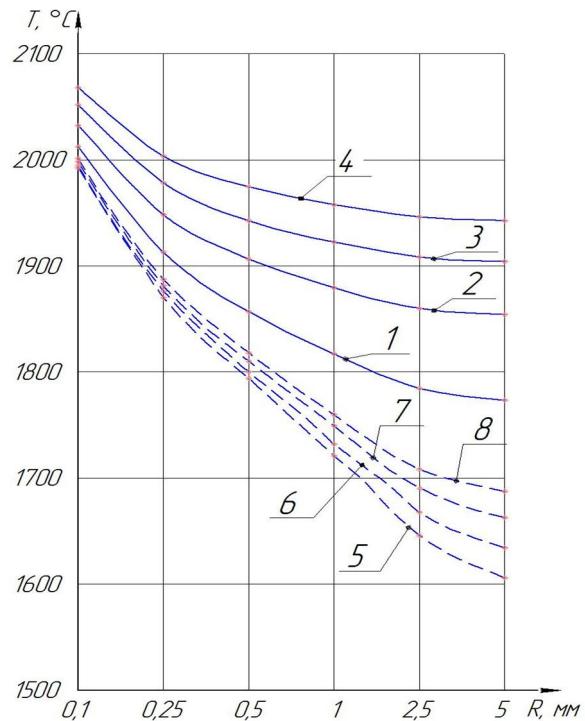


Рис.5. Изменение температуры поверхности цилиндрического канала проплавления при сварке алюминия (1-4) вертикальным и (5-8) горизонтальным электронными пучками. Толщина металлов: 1, 6 – 50 мм; 2, 7 – 100 мм; 3, 8 – 150 мм; 4 – 200 мм; 5 – 20 мм.

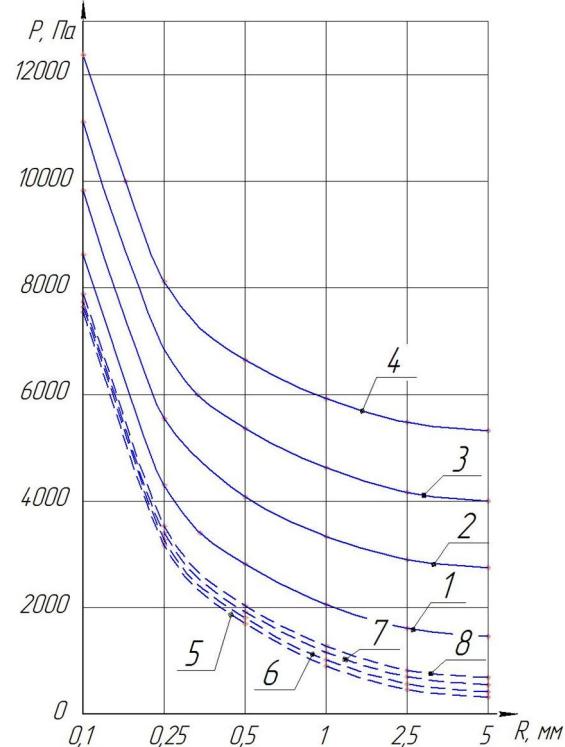


Рис. 6. Зависимость давления паров в цилиндрическом канале проплавления при сварке алюминия (1-4) вертикальным и (5-8) горизонтальным электронными пучками. Толщина металлов: 1, 6 – 50 мм; 2, 7 – 100 мм; 3, 8 – 150 мм; 4 – 200 мм; 5 – 20 мм.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что с увеличением диаметра канала температура равновесной поверхности кратера снижается. При радиусах канала от 0,1 мм до 5 мм заметно сказывается действие сил тяжести на расплавленный металл.

При сварке горизонтальным электронным пучком с увеличением толщины свариваемого металла наблюдается некоторое возрастание расчетных температур и давления. Например, для никеля при радиусе канала 2,5 мм с ростом толщины проплавляемого образца от 50 мм до 150 мм, температура поверхности канала возрастает на 1,83%, для титана 1,73%, для алюминия на 1,99%, а давление паров в канале возрастает на 27,18% для никеля, на 28,13% для титана, на 30,52% для алюминия. В тоже время при сварке аналогичных толщин вертикальным пучком электронов с радиусом канала 2,5 мм температура канала увеличивается соответственно на 6,67 % для никеля, на 5,07% для титана, на 5,61% для алюминия, а давление паров увеличивается на 64,79% для никеля, на 60,13% для титана, на 61,72% для алюминия.

Давление паров в канале (см. рис. 2, 4, 6) существенно зависит от температуры поверхности канала, размеров кратера, толщины свариваемого материала и ориентации электронного луча в пространстве. Экспоненциальная зависимость давления паров от температуры стенок канала объясняет это влияние: из-за небольшого изменения значения температуры, ощутимо меняется величина давления и соответственно величина силы поверхностного натяжения в кратере. Изменение соотношения этих сил влечет за собой изменение размеров канала проплавления и как следствие движения жидкого металла в сварочной ванне.

Литература.

1. Теория сварочных процессов / Под ред. В.В. Фролова.- М.: Высшая школа, 1988.- 589 с.
2. Технология создания неразъемных соединений при производстве газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев, С.Б. Масленков, В.А. Гейкин, В.А. Поклад.- М.: Наука и технология, 2001.- 544 с.
3. Бондарев А.А., Воропай Н.М. О силах, действующих на сварочную ванну при проплавлении алюминиевых сплавов электронным лучом. Физика и химия обработки материалов, 1974, №2, с.50-55.
4. Веригин А.М., Ерохин А.А., Шавырин В.Н. Оценка скорости разлета парогазовой фазы при глубинном проплавлении металла электронным лучом. Физика и химия обработки материалов. 1980, №5, с.149-151.
5. Ланкин Ю.Н. Оценка температуры и давления паров в канале проплавления при электроннолучевой сварке. Автоматическая сварка, 1978, №2, с.16-19.
6. Лесков Г.И., Живага Л.И. Формирование швов при электроннолучевой сварке сталей большой толщины в различных пространственных положениях. Автоматическая сварка, 1980, №10, с.1-5.
7. Патон Б.Е., Назаренко О.К., Локшин В.Е. Особенности ЭЛС в различных пространственных положениях. Автоматическая сварка, 1972, №6, с.1-4.
8. Патон Б.Е., Лесков Г.И., Живага Л.И. Специфика образования шва при ЭЛС. Автоматическая сварка, 1976, №3, с.1-5.
9. Акопьянц К.С., Зубченко Ю.В., Локшин В.Е. Влияние ускоряющего напряжения на параметры проплавления при электроннолучевой сварке. Автоматическая сварка, 1972, №11, с.11-15.
10. Ольшанский Н.А., Мамутов Е.Л. Расчет давления паров в канале проплавления при электроннолучевой сварке различных материалов. Электронная обработка материалов, 1970, №6, с.3-8.
11. Рыкалин Н.И., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электроннолучевой обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1978, 239 с.
12. Tong H., Giedt W.H. Depth of penetration during electron beam welding. Pap. Amer. Soc. Mech. Eng. 1970, N WA/HT-2, p. 1-9.
13. Ершов Г.С., Черняхов В.А. Строение и свойства жидких и твердых металлов.- М.: Металлургия, 1978, 248с.
14. Авдеев М.В. Анализ гидродинамических явлений в сварочной ванне. Сварочное производство, 1973, № 10, с.1-3»

Воронежский государственный технический университет

CALCULATION OF SURFACE TEMPERATURES AND VAPOR PRESSURE IN THE CHANNELS OF PENETRATION

R.Y. Kireev, V. R. Petrenko, V.P. Chumarniy

The article examines the change in temperature of the cylindrical surface of the penetration channel and pressure arising therein during welding of alloys vertical and horizontal electron beams. The comparative evaluation of the distribution of temperatures and pressures for the two schemes welding

Key words: vapor pressure steam-gas channel, the hydrostatic pressure of the liquid column