

УДК 621.791.72.052

В. А. ПЕРЕРВА, Е. В. КАРПОВИЧ, А. В. ФЕДОСОВ, Е. А. ДЖУР*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Украина***ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПОЛЫМ КАТОДОМ С РАЗЛИЧНОЙ РАЗДЕЛКОЙ КРОМОК**

В работе предлагается способ прогнозирования геометрических характеристик сварных соединений из высокопрочного титанового сплава ВТ6С в зависимости от различной разделки кромок, выполненных полым катодом в вакууме. Проведенные исследования основаны на анализе результатов теоретических и экспериментальных исследований с определением коэффициента пропорциональности. Данный метод обеспечивает высокую точность расчета размеров сварного шва и может применяться в производственных условиях для обеспечения необходимых параметров качества соединения и технологических параметров сварочного процесса.

Ключевые слова: высокопрочные титановые сплавы, математическая физика, сварка полым катодом, математическое моделирование.

1. Современное состояние вопроса и анализ последних исследований и публикаций

С развитием космической техники возникает необходимость сваривать детали толщиной от нескольких микрометров до одного сантиметра, а вместо углеродистых и низколегированных сталей использовать специальные сплавы на основе титана.

Стремление объединить преимущества вакуумной защиты с простой надежностью оборудования для дуговой сварки плавлением привело к созданию сварки полым катодом в вакууме. Использование сварки полым катодом начинает находить все более широкое применение при изготовлении конструкций из высокопрочных титановых сплавов малой толщины. Наиболее перспективными являются высоколегированные термостойкие титановые сплавы, которые позволяют реализовать наилучшее сочетание физико-механических и конструктивных свойств изделий. Однако сварка таких сплавов существенно затруднена в связи с высокой химической активностью титана в условиях повышенных температур и особенностями структурных изменений и фазовых превращений в шве и в зоне термического влияния при сварочном термическом цикле, что приводит к образованию хрупких фаз и разного рода дефектов в соединении [1].

Для получения бездефектных сварных швов и высоких показателей прочности с сохранением удовлетворительной ударной вязкости необходимо постоянно совершенствовать технологические процессы изготовления сварных конструкций из термостойких титановых сплавов.

В сравнении с аргонодуговой сваркой по флюсу и сваркой погруженной дугой сварка титановых сплавов полым катодом позволяет регулировать ширину и глубину проплавления при меньшей погонной энергии и снизить в 200–300 раз затраты на аргон [2]. Однако данный метод сварки недостаточно изучен и имеет ограниченное применение в производстве, отсутствия систематических данных по сварочным свойствам полого катода и, как следствие, отсутствия методик для выбора параметров режима сварки полым катодом [3].

Расчетные методики для определения геометрических параметров сварного соединения, основанные на специализированных программных комплексах, позволяют учесть некоторые особенности моделируемого процесса сварки, но требуют дорогостоящего технического и интеллектуального оснащения и в производственных условиях сложны в применении [4]. В большинстве случаев для реализации технологического процесса сварки на предприятии возникает проблема корректной математической обработки экспериментальных данных для получения зависимостей геометрических параметров сварного шва от режимов сварки. Как следствие, появляется необходимость создания способа, применимого в производственных условиях, и позволяющего прогнозировать геометрические характеристики сварного соединения из высокопрочных титановых сплавов в зависимости от параметров сварки полым катодом в вакууме [5–6].

В работе [7] было получено уравнение, связывающее технологические параметры сварки и геометрические характеристики проплавления, с учетом зависимостей теплофизических характеристик свариваемого материала от температуры. Это позво-

лило спрогнозировать геометрические параметры зоны проплавления и получить качественный сварной шов. При этом уменьшается количество брака и снижаются затраты энергии и материала на производство изделия.

Данное уравнение справедливо для сварки деталей встык без разделки кромок. При сварке деталей с зазором или разделке свариваемых кромок объем расплавляемого материала уменьшается, что приводит к изменению затрачиваемой энергии на расплавление и геометрии сварного шва. Следовательно, в уравнении теплового баланса сварки полым катодом пластин заданной толщины встык необходимо учесть форму зоны проплавления, которая будет зависеть от наличия зазора между свариваемыми кромками и их разделки.

2. Постановка задачи. Теоретические и экспериментальные исследования

Задачей данной работы является создание способа, применимого в производственных условиях и позволяющего прогнозировать геометрические характеристики сварного соединения в зависимости от технологических параметров сварки полым катодом в вакууме и различной разделки кромок.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- определить математическую аналитическую взаимозависимость между различной разделкой кромок и геометрическими параметрами проплавления;
- разработать способ вычисления геометрических размеров зоны проплавления от различной разделки кромок;
- проанализировать отклонение экспериментальных данных от теоретических результатов и определить коэффициент пропорциональности для уточнения математической модели процесса сварки;

Для решения поставленных задач проведена сварка на образцах титанового сплава ВТ6С размером 200x150x5 мм и 250x150x8 мм. с различной разделкой кромок. Сварка проводилась при следующих режимах: ток разряда $I = 220\text{--}310$ А; напряжение разряда $U = 25\text{--}36$ В; длина дуги $L_d = 10\text{--}13$ мм; скорость сварки $V_{св} = 33\text{--}42$ м/час; расход плазмообразующего газа аргона $Q_{Ar} = 2,5\text{--}2,7$ л/час.

Образцы сваривались с различной разделкой свариваемых кромок со стороны проплава. Расположение катода было наклонным с углом $20\text{--}23^\circ$ от вертикальной оси (рис. 1). Экспериментальные исследования проводились при различных комбинациях режимов и условий сварки, что позволило определить влияние отдельных параметров на геометрические характеристики сварного соединения и

сформулировать технологические требования к проведению сварочного процесса.

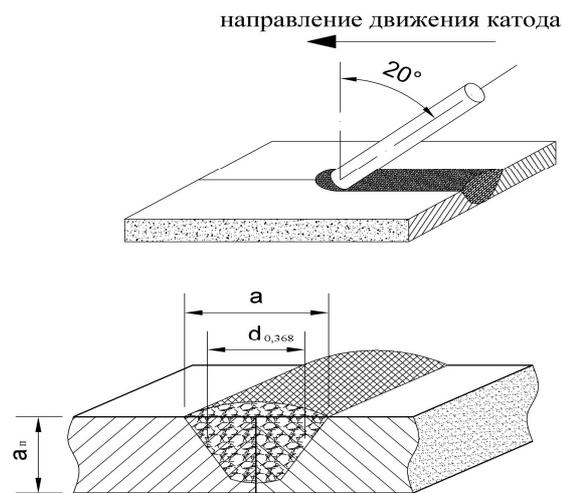


Рис. 1. Расчетная схема сварки полым катодом

Прогнозирование геометрических характеристик зоны проплавления в зависимости от режимов сварки было выполнено комбинированным методом в работе [7], включающим в себя теоретическое рассмотрение процесса проплавления с корректировкой его по полученным экспериментальным результатам. В этой работе была получена такая математическая зависимость геометрических характеристик от режимов сварки без разделки кромок.

$$d_{0,368}^p = \frac{\eta_3 UI \cos \gamma - 0,5 \pi a_n \int_{T_0}^{T_{пл}} \lambda(T) dT}{a_n \nu \rho \left[1,785 \int_{T_0}^{T_{пл}} c_p(T) dT + L_{пл} \right]}, \quad (1)$$

где $d_{0,368}^p$ – расчетный диаметр проплавления на уровне $1/e$ от поверхности пластины с верхней стороны сварного шва, м;

η_3 – эффективный КПД;

U, I – ток и напряжение разряда, В, А;

γ – угол наклона катода от вертикальной оси, $\gamma = 20^\circ$;

a_n – глубина проплавления, м;

T_0 – начальная температура, принимается $T_0 = 300$ К;

$T_{пл}$ – температура плавления свариваемого материала, К;

ν – скорость сварки, м/с;

ρ – плотность свариваемого материала, кг/м^3 ;

$c_p(T), \lambda(T)$ – температурные зависимости теплоемкости и теплопроводности свариваемого материала, соответственно.

Экспериментальные значения диаметра проплавления $d_{0,368}^{\text{эксп}}$ на уровне $1/e$ от поверхности пла-

стины с верхней стороны сварного шва определялись по формуле

$$d_{0,368}^{эксп} = K \cdot d_{0,368}^p, \quad (2)$$

где K – коэффициент пропорциональности, позволяющий выполнить уточнение математической модели процесса.

В случае различной разделки кромок под сварку (рис. 2 и 3) необходимо учесть площадь сечения срезаемого слоя. Данная площадь окажет влияние на мощность, затраченную на образование сварного соединения и на мощность, отведенную от сварочной ванны теплопроводностью.

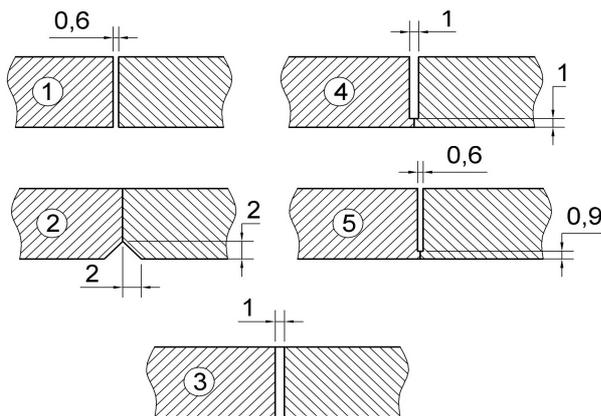


Рис. 2. Варианты разделки кромок для толщины пластин 8мм: 1, 3 – зазор между кромками; 2 – разделка кромок со стороны проплава; 4, 5 – паз в верхней части стыка

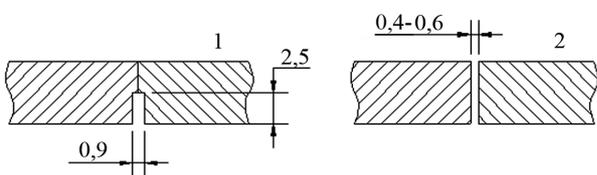


Рис. 3. Варианты разделки кромок для толщины пластин 5мм: 1 – паз в нижней части стыка; 2 – зазор между кромками

В таком случае выражение теплового баланса примет следующий вид:

$$\eta_3 \cdot U \cdot I = \frac{(a_n \cdot d_{0,368}^p - S)}{\cos \gamma} \cdot v \cdot \rho \times \left(\int_{T_0}^{T_{пл}} c_p(T) dT + L_{пл} \right) + \frac{(0,5 \cdot \pi \cdot a_n \cdot d_{0,368}^p - S)}{\cos \gamma} \times \left(\frac{1}{d_{0,368}^p} \int_{T_0}^{T_{пл}} \lambda(T) dT + \frac{v \cdot \rho}{2} \cdot \int_{T_0}^{T_{пл}} c_p(T) dT \right), \quad (3)$$

где S – площадь сечения срезаемой кромки или зазора.

Уравнение энергетического баланса (3) можно представить в следующем виде:

$$d_{0,368}^p{}^2 \cdot A + d_{0,368}^p \cdot B + C = 0, \quad (4)$$

где $A = a_n \cdot v \cdot \rho \cdot \left(1,785 \int_{T_0}^{T_{пл}} c_p(T) dT + L_{пл} \right);$

$$B = 0,5 \cdot \pi \cdot a_n \int_{T_0}^{T_{пл}} \lambda(T) dT - S \cdot v \cdot \rho \times$$

$$\times \left(1,5 \int_{T_0}^{T_{пл}} c_p(T) dT + L_{пл} \right) - \eta_3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \gamma;$$

$$C = -S \cdot \int_{T_0}^{T_{пл}} \lambda(T) dT.$$

Решением уравнения (4) является выражение:

$$d_{0,368}^p = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A}. \quad (5)$$

Экспериментальное значение диаметра проплавления будет определяться в соответствии с формулой (2).

Совместный анализ экспериментальных и расчетных значений диаметра проплавления показал, что величина коэффициента пропорциональности K для толщины пластин $a_n = 5$ мм изменяется от 0,95 до 1,08, а при $a_n = 8$ мм – от 0,98 до 1,38 (табл. 1, 2).

Таблица 1

Значения диаметров проплавления $d_{0,368}^p$, $d_{0,368}^{эксп}$, $d_{0,368}^{пр}$ и коэффициента пропорциональности K при сварке полым катодом пластин из титанового сплава ВТ6С толщиной 5 мм

Вид разделки кромок	Эффективный КПД η_3	Ток разряда I, А	Напряжение разряда U, В	Скорость сварки v, м/с	Расчетные значения $d_{0,368}^p$, м · 10 ⁻³	Экспериментальные значения $d_{0,368}^{эксп}$, м · 10 ⁻³	Коэффициент пропорциональности K	Прогнозируемые значения $d_{0,368}^{пр}$, м · 10 ⁻³	Погрешность, %
1	0,95	220	26	0,01	9,15	9,88	1,08	9,24	6,45
2 зазор 0,6	0,95	225	26,0	0,01	9,56	9,06	0,95	9,66	6,68
2 зазор 0,5	0,95	225	25,5	0,01	9,29	9,06	0,97	9,39	3,66
2 зазор 0,4	0,95	225	25,0	0,01	9,02	9,06	1,08	9,11	0,63
Среднее значение коэффициента K							1,01		

Значения коэффициентов K для толщины пластин 5 мм при различной разделке кромок и режимах сварки изменяются незначительно. Погрешность вычисления прогнозируемых диаметров проплавления $d_{0,368}^{пр}$ по формуле (5) со средним значением коэффициента $K_{ср} = 1,01$ составит от 0,63 до

6,68 % , что вполне приемлемо для инженерных расчетов.

Таблица 2

Расчетные значения диаметра проплавления $d_{0,368}^p$ и коэффициента пропорциональности K при сварке полым катодом пластин из титанового сплава ВТ6С толщиной 8 мм

Вид разделки кромок	Эффективный КПД ηэ	Ток разряда I, А	Напряжение разряда U, В	Скорость сварки v, м/с	Расчетные значения $d_{0,368}^p, м \cdot 10^{-3}$	Экспериментальные значения $d_{0,368}, м \cdot 10^{-3}$	Коэффициент пропорциональности K
1	0,95	280	31,0	0,01	8,88	10,00	1,13
2	0,95	310	35,0	0,01	10,76	10,50	0,98
3	0,95	270	30,0	$9,17 \cdot 10^{-3}$	9,35	11,14	1,19
4	0,95	270	30,0	0,01	8,54	10,77	1,26
5	0,95	275	30,5	0,01	8,52	11,77	1,38

При сварке пластин толщиной 8 мм коэффициент K изменяется в широком диапазоне (табл. 2), что вероятно связано с изменением площади проплавления, которая в свою очередь зависит от вида и размеров разделки свариваемых кромок. Режимы сварки при этом изменяются незначительно.

В работе [7] показаны параболические зависимости расчетного значения коэффициента пропорциональности от величины погонной энергии. В связи с этим, можно предположить, что зависимость коэффициента K от площади S будет аналогичного вида.

Численная проверка данного предположения позволила определить корреляционные зависимости коэффициента K от площади S (рис. 4, формулы (6), (7)) для двух характерных участков с площадью S от $2 \cdot 10^{-6}$ м до $4,8 \cdot 10^{-6}$ м и от $4,8 \cdot 10^{-6}$ м до $8 \cdot 10^{-6}$ м:

– при S от $2 \cdot 10^{-6}$ м до $4,8 \cdot 10^{-6}$ м

$$K_p = -2,32 \cdot 10^{11} \cdot S^2 + 1,63 \cdot 10^6 \cdot S - 1,36 ; \quad (6)$$

– при S от $4,8 \cdot 10^{-6}$ м до $8 \cdot 10^{-6}$ м

$$K_p = -4,12 \cdot 10^{10} \cdot S^2 + 5,47 \cdot 10^5 \cdot S - 0,55 , \quad (7)$$

где K_p – расчетное значение коэффициента пропорциональности.

Прогнозируемые значения диаметра проплавления $d_{0,368}^{пр}$, определенные с учетом расчетного значения K_p по формулам (6), (7), отличаются от экспериментальных на величину погрешности не более 0,73 % (табл. 3). Следовательно, зависимости (6), (7) могут использоваться для определения коэффициента пропорциональности прогнозирования K_p и, затем, диаметра проплавления с достаточной степенью точности.

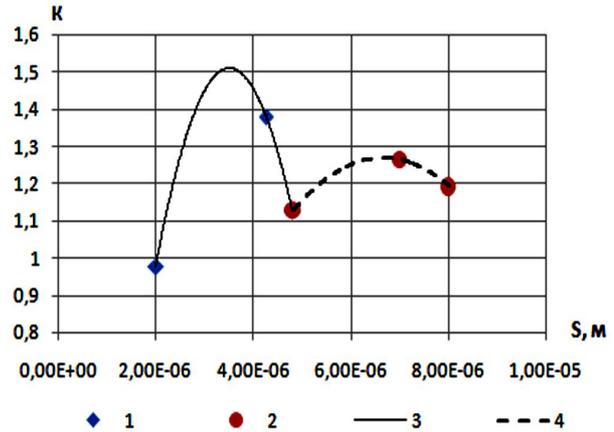


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропорциональности K_p от величины S для пластин толщиной 8 мм: 1 – при S от $2,0 \cdot 10^{-6}$ м до $4,8 \cdot 10^{-6}$ м; 2 – при S от $4,8 \cdot 10^{-6}$ м до $8,0 \cdot 10^{-6}$ м; 3, 4 – полиномиальные кривые для рядов данных 1 и 2, соответственно

Таблица 3

Значения диаметров проплавления $d_{0,368}^p, d_{0,368}^{экс}$

и коэффициента пропорциональности K при сварке полым катодом пластин из титанового сплава ВТ6С толщиной 8 мм

Вид разделки кромок	$S, м^2$	Расчетные значения $d_{0,368}^p, м \cdot 10^{-3}$	Расчетное значение коэффициента пропорциональности K_p	Прогнозируемые значения $d_{0,368}^{пр}, м \cdot 10^{-3}$	Экспериментальные значения $d_{0,368}, м \cdot 10^{-3}$	Погрешность, %
2	$2,00 \cdot 10^{-6}$	10,76	0,97	10,46	10,50	0,43
5	$4,26 \cdot 10^{-6}$	8,52	1,37	11,70	11,76	0,55
1	$4,80 \cdot 10^{-6}$	8,88	1,12	9,93	10,00	0,73
4	$7,00 \cdot 10^{-6}$	8,54	1,26	10,75	10,76	0,18
3	$8,00 \cdot 10^{-6}$	9,35	1,19	11,11	11,13	0,21

Анализ проведенных расчетов показал, что при сварке полым катодом стыковых соединений из титанового сплава ВТ6С с толщиной свариваемых деталей 5 мм и разделками кромок, приведенными в данной работе (рис. 3), прогнозирование геометрических параметров зоны проплавления можно выполнять по формуле (2) на основе расчетных значений $d_{0,368}^p$, определяемых по формуле (5), и среднего значения коэффициента пропорциональности $K_{ср} = 1,01$. При этом погрешность составит не более 6,68 %. Прогнозирование геометрических параметров зоны проплавления для сварных соединений деталей из сплава ВТ6С с толщиной 8 мм и различной разделкой кромок (рис. 2) включает в себя такие этапы:

- определение площади S , образованной сечением срезаемой кромки или зазором;
- вычисление расчетного значения диаметра проплавления $d_{0,368}^p$ по формуле (5);
- определение расчетного значения коэффициента пропорциональности K_p по формуле (6) или (7), в зависимости от площади S ;
- расчет прогнозируемого значения диаметра проплавления $d_{0,368}^{pp}$ по формуле (2).

При этом определение прогнозируемых диаметров проплавления выполняется с точностью до 0,73 % от экспериментально полученных значений.

Теоретическое рассмотрение энергетического баланса процесса сварки и экспериментальных данных позволило получить математическое выражение, с приемлемой для технических расчетов точностью, связывающее геометрические характеристики проплавления и параметры режима сварки полым катодом.

Разработанная модель дополняет предыдущую, приведенную в работе [7] и позволяет проводить как прямые расчеты параметров режима сварки, так и обратные, прогнозировать ожидаемую величину геометрических параметров зоны проплавления по заданному режиму сварки и материалу.

Выводы

Проведенные исследования, основанные на комбинированном методе анализа результатов теоретических и экспериментальных значений, позволяют прогнозировать геометрические параметры зоны проплавления для технологии сварки полым катодом с учетом различной разделки кромок.

Для получения математического уравнения, учитывающего различную разделку кромок, взаимозависимость технологических параметров сварки с геометрическими характеристиками проплавления, зависимость теплофизических характеристик свариваемого материала от температуры, требуется ограниченное количество экспериментальных исследований, ориентированных на получение сварных соединений с требуемыми физико-механическими характеристиками в предполагаемом диапазоне параметров сварки. В производственных условиях прогнозирование геометрических характеристик сварного шва выполняется на основе расчетных значений геометрических параметров зоны проплавления $d_{0,368}^p$ и величины коэффициента пропорциональности K или K_p , определяемого в зависимости от режимов сварки и способа расположения и подготовки свариваемых поверхностей.

Литература

1. Senkara, J. Contemporary car body steels for automotive industry and technological guidelines of their pressure welding [Text] / J. Senkara // *Welding International*. – 2013. – Vol. 27, Iss. 3. – P. 184–189. doi: 10.1080/09507116.2011.600028
2. Перерва, В. А. Особенности сварки шаробаллонов в вакууме полым катодом [Текст] / В. А. Перерва, Е. В. Карпович // *Космическая техника. Ракетное вооружение : Научно-технический сборник*. – 2010. – Вып. 2. – С. 137–150.
3. Неровный, В. М. Повышение эффективности дуговой сварки в вакууме титановых сплавов [Текст] / В. М. Неровный // *Сварка и диагностика*. – 2012. – № 5. – С. 18–22.
4. Ельцов, В. В. Математическое моделирование процесса формирования усадочного кратера при наплавке [Текст] / В. В. Ельцов, В. П. Потехин, О. А. Дитенков // *Сварочное производство*. – 2012. – № 1. – С. 3–9.
5. Nerovnyi, V. M. Hollow cathode arc discharge as an effective energy source for welding processes in vacuum [Text] / V. M. Nerovnyi, A. D. Khakhalev // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2008. – Vol. 41, No. 3. – P. 2452–2459. doi: 10.1088/0022-3727/41/3/035201
6. Щербаков, А. В. Физико-математическая модель исследования процессов теплопередачи при электронно-лучевой сварке изделий произвольной формы [Текст] / А. В. Щербаков, А. Л. Гончаров, М. А. Портнов // *Сварочное производство*. – 2011. – № 11. – С. 6–13.
7. Перерва, В. А. Разработка способа прогнозирования размеров зоны проплавления для технологии сварки полым катодом титановых шаробаллонов [Текст] / В. А. Перерва, Е. В. Карпович, А. В. Федосов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Прикладная физика. материаловедение*. – 2016. – Т. 1, № 5(79). – С. 47 – 52. Doi: 10.15587/1729-4061.2016.59790.

References

1. Senkara, J. Contemporary car body steels for automotive industry and technological guidelines of their pressure welding. *Welding International*. 2013, vol. 27, no. 3, pp. 184–189. doi: 10.1080/09507116.2011.600028
2. Pererva, V. A., Karpovich, E. V. Osobnosti svarki sharoballonov v vakuume polym katodom [Features ball-balloon welding in a vacuum hollow cathode]. *Space technology. Missiles: Scientific and technical collection*, 2010, no. 2, pp. 137–150.
3. Nerovnyi, V. M. Povyshenie effektivnosti dugovoi svarki v vakuume titanovykh splavov [Improved arc welding in vacuum of titanium alloys]. *Welding and diagnostic*, 2012, no 5, pp. 18–22.
4. El'tsov, V. V., Potekhin, V. P., Ditenkov, O. A. Matematicheskoe modelirovanie protsessa formirovaniya usadochnogo kratera pri naplavke [Mathematical

modeling of the formation of the crater shrinkage during surfacing]. *Welding production*, 2012, no. 1, pp. 3–9.

5. Nerovnyi, V. M., Khakhalev, A. D. Hollow cathode arc discharge as an effective energy source for welding processes in vacuum. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008. vol. 41, no. 3, pp. 2452–2459. doi: 10.1088/0022-3727/41/3/035201

6. Shcherbakov, A. V., Goncharov, A. L., Portnov, M. A. Fiziko-matematicheskaya model' issledovaniya protsessov teploperedachi pri elektronno-luchevoi svarke izdelii proizvol'noi formy [Physical and mathematical model study of heat transfer processes in

electron beam welding articles of arbitrary shape]. *Welding production*, 2011, no. 11, pp. 6–13.

7. Pererva, V. A., Karpovich, E. V., Fedosov, A. V. Razrabotka sposoba prognozirovaniya razmerov zony proplavlenniya dlya tekhnologii svarki polym katom titanovykh sharoballonov [Development of penetration zone size prediction technique for hollow-cathode welding technology of spherical titanium tanks]. *Eastern-European journal of enterprise technologies. Applied physics. materials science*, 2016, vol. 1, no. 5(79), pp. 47 – 52. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59790

Поступила в редакцію 11.03.2016, рассмотрена на редколлегии 14.04.2016

ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗМІРІВ ЗОНИ ПРОПЛАВЛЕННЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ПОЛИМ КАТОДОМ З РІЗНОЮ ОБРОБКОЮ КРОМОК

В. О. Перерва, О. В. Карпович, О. В. Федосов, Є. О. Джур

У роботі пропонується спосіб прогнозування геометричних характеристик зварних з'єднань з високоміцного титанового сплаву VT6С в залежності від різної обробки кромки полим катодом в вакуумі. Проведені дослідження засновано на аналізі результатів теоретичних і експериментальних досліджень з визначенням коефіцієнта пропорційності. Даний метод забезпечує високу точність розрахунку розмірів зварного шва і може застосовуватися у виробничих умовах для забезпечення необхідних параметрів якості з'єднання і технологічних параметрів зварювального процесу.

Ключові слова: високоміцні титанові сплави, математична фізика, зварювання полим катодом, математичне моделювання.

PREDICTION SIZE OF THE ZONE OF PENETRATION FOR WELDING HOLLOW CATHODE WITH DIFFERENT CUTTING EDGES

V. A. Pererva, E. V. Karpovich, A. V. Fedosov, E. A. Djur

Implementing the process of hollow-cathode vacuum welding at the plant requires correct mathematical processing of experimental data in order to obtain dependencies of depending on various cutting edges formed of the weld on welding conditions. A technique for predicting the geometry of the welded joints obtained by hollow-cathode vacuum welding depending on the welding variables is proposed. The analysis was conducted on samples made of high-strength titanium alloys VT6S. The technique showed that the combined method based on a joint analysis of the results of theoretical and experimental studies allows predicting the geometrical parameters of the penetration zone with a sufficient degree of accuracy. This technique provides a high accuracy of the calculation of the weld sizes in a predetermined range of welding conditions and can be applied in a production environment.

Key words: high strength titanium alloys, electron beam welding, mathematical physics, welding hollow-cathode, mathematical modeling.

Перерва Віктор Олександрович – ст. викладач, каф. технології виробництва, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: Pererva.viktor@gmail.com.

Карпович Олена Володимирівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: kelv@ua.fm.

Федосов Олексій Вікторович – аспірант каф. технології виробництва, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: fedosov.fav@gmail.com.

Джур Євген Олексійович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. технології виробництва, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпропетровськ, Україна.

Pererva Viktor – Teacher, Department of Manufacturing Technology, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Ukraine, e-mail: Pererva.viktor@gmail.com.

Karpovich Elena – PhD, Associate professor, Department of Manufacturing Technology, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Ukraine, e-mail: kelv@ua.fm.

Fedosov Alexey – PhD Student, Department of Manufacturing Technology, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Ukraine, e-mail: fedosov.fav@gmail.com.

Djur Eugene – Doctor of Technical Science, Professor, Department of Manufacturing Technology, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Ukraine.