

- «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій». Збірник наукових статей з результатами, отриманими в 2007–2008 рр. – К.: 2009. – С. 682–686.
19. Лебедев, А. А. Метод диагностики состояния материала по параметрам рассеяния характеристик твердости [Текст] / А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка, Н. Л. Волчек // Завод. лаб. – 2003. – № 12. – С. 49–51.
  20. Lebedev, A. A. A new method of assesment of material degradation during its operating time [Text] / A. A. Lebedev, N. R. Muzyka, N. L. Volchek // Zaliznychnyi Transport Ukrainy. – 2003. – Vol. 5. – P. 30–33.
  21. Кузін, О. Вплив умов отримання виливків на формування технологічних пошкоджень [Текст]: тези доповідей / О. Кузін, Я. Кусий, В. Топільницький / 12-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові, 2015. – С. 115–116.
  22. Кузін, О. А. Структура і міжзеренна пошкоджуваність сталей [Текст] / О. А. Кузін, М. О. Кузін // Українська академія друкарства, наукові записки. – 2013. – № 4 (45). – С. 99–115.
  23. Куликов, Д. В. Физическая природа разрушения [Текст]: учеб. пос. / Д. В. Куликов, Н. В. Мекалова, М. М. Закиричная. – Уфа: УГНТУ, 1999. – 239 с.

*У роботі пропонується спосіб прогнозування геометричних характеристик зварних з'єднань з титанового сплаву ВТ6С в залежності від параметрів зварювання порожнистим катодом у вакуумі. Даний метод забезпечує високу точність розрахунку розмірів зварного шва і може застосовуватися у виробничих умовах для забезпечення необхідних параметрів якості з'єднання та технологічних параметрів зварювального процесу*

*Ключові слова: високоміцні титанові сплави, математична фізика, зварювання полым катодом, математичне моделювання*

*В работе предлагается способ прогнозирования геометрических характеристик сварных соединений из титанового сплава ВТ6С в зависимости от параметров сварки полым катодом в вакууме. 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*

УДК 621.791.754'293

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59790

## РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ПОЛЫМ КАТОДОМ ТИТАНОВЫХ ШАРОБАЛЛОНОВ

**В. А. Перерва**

Научный сотрудник\*

E-mail: Pererva.viktor@gmail.com

**Е. В. Карпович**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: kelv@ua.fm

**А. В. Федосов**

Аспирант\*

E-mail: fedosov.fav@gmail.com

\*Кафедра технологии производства

Днепропетровский национальный

университет им. О. Гончара

пр. Гагарина, 72, г. Днепропетровск, Украина, 49010

### 1. Введение

Значительная часть сварных конструкций в реактивных двигательных установках ракет-носителей и авиационной техники выполняется методом автоматической аргоно-дуговой сварки с неплавящимся электродом. При этом в узлах и агрегатах преобладают стыковые сварные соединения из коррозионноустойчивых материалов, требуемое качество которых обеспечивается не только тщательным контролем режимов сварки, но и за счет применения специальных

технологических приемов. В зависимости от толщины и конфигурации свариваемых кромок, при сварке с полным проплавлением, могут использоваться специальные подкладки, устанавливаемые с обратной стороны шва, или замковые соединения. Окончательная конфигурация сварного соединения в конструкции достигается последующей механической обработкой. Однако данная технология применима только для соединений с доступом к верхней и нижней поверхности зоны сварки на всех этапах технологического процесса и не может использоваться для

замкнутых закрытых сварных швов, используемых при сварке шаробаллонов системы предварительного наддува топливных баков.

Шаробаллоны изготавливаются из высокопрочных титановых сплавов и нержавеющей стали и применяются на всех современных ракетносителях для подачи топлива под давлением в газогенератор и камеру сгорания. В процессе работы они находятся под действием внутреннего давления 22–34 МПа при криогенных температурах 77 К (–196 °С) и должны обеспечивать надёжную работу на протяжении всего цикла эксплуатации [1]. Конструктивной особенностью шаровых баллонов является расположение нижней стороны сварного соединения внутри замкнутой шаровой полости, что требует применения методов односторонней сварки, обеспечивающих надежное и качественное формирование сварного шва по всему периметру на весу.

Шаробаллоны из титановых сплавов составляют примерно 70 % от всего объема производства баллонов высокого давления. Их сварка выполняется методом автоматической аргоно-дуговой сварки погруженной дугой в камерах с контролируемой атмосферой. Основным недостатком применяемого метода является чувствительность длины дуги к колебаниям режимов сварки, что приводит к изменению ее проплавливающей способности и нестабильности геометрии сварного шва [2].

---

## 2. Анализ литературных данных и постановка задачи

Получение качественного сварного шва шаробаллонов требует совершенствования технологии сварки. Стремление объединить преимущества вакуумной защиты с простой надежностью оборудования для дуговой сварки плавлением привело к созданию сварки полым катодом в вакууме [3].

Способ сварки в вакууме полым катодом позволяет исключить указанный ранее недостаток и получить дугу с одинаковой проплавливающей способностью при колебаниях ее длины в большом диапазоне [4]. Кроме того, сварка полым катодом в вакууме обеспечивает высокую степень защиты металла, повышенную концентрацию тепловой энергии и не требует применения сложного дорогостоящего оборудования, как при электронно-лучевой сварке [5]. В сравнении с аргонодуговой сваркой по флюсу и сваркой погруженной дугой сварка шаробаллонов полым катодом позволяет регулировать ширину и глубину проплавления при меньшей погонной энергии и снизить в 200–300 раз затраты на аргон. Однако данный метод сварки имеет ограниченное применение в производстве из-за недостаточной изученности самого процесса, отсутствия систематических данных по сварочным свойствам полого катода и, как следствие, отсутствия методик для выбора параметров режима сварки полым катодом. Выбор режимов сварки производится по экспериментальным данным, полученным для одного или группы материалов с ограниченным диапазоном толщин свариваемых деталей [6].

Теоретическое описание процессов сварки полым катодом в работе [7] выполняли на основе общей теории теплопроводности. К сожалению, это описание не

учитывало всех особенностей разряда полым катодом и не применимо в производстве.

Предложенная в работе [8] физико-математическая модель процесса электронно-лучевой сварки, учитывающая деформацию поверхности сварочной ванны и угловую апертуру электронного пучка, основана на фокусировке луча и не применима к дуговым сваркам.

Математическая модель формирования кратера, предложенная в работе [9], возникающего при завершении дуговой наплавки металла в результате обычной усадки позволяет рассчитывать формулу поверхности кратера в зависимости от эволюции температурного поля во времени. Однако не учитывает изменение структуры физических свойств металла от температуры и ограничено применимостью только при сварке погруженной дугой.

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 [10]. 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 [11]. 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. Это позволило бы получить качественный сварной шов, что уменьшит количество брака и сэкономит затраты энергии и материала на производство изделия.

---

## 3. Цель и задачи исследования

Целью 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 титановых шаробаллонов.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- определить математическую аналитическую взаимозависимость между параметрами сварки полым катодом и геометрическими параметрами проплавления;
- разработать способ вычисления геометрических размеров зоны проплавления;
- проанализировать отклонение экспериментальных данных от теоретических результатов и определить коэффициент пропорциональности для уточнения математической модели процесса сварки;
- разработать методику, применимую в рабочих условиях, которая позволит прогнозировать геометрические параметры в рассматриваемом диапазоне режимов сварки.

**4. Материалы и методы исследований взаимосвязи между геометрическими параметрами зоны проплавления и электрическими характеристиками сварки полым катодом**

Экспериментальная отработка технологии сварки полым катодом проводилась на образцах из титанового сплава ВТ6С с размерами 200×150×5 мм и 250×150×8 мм. Сварка проводилась при следующих режимах: ток разряда I=220–310 А; напряжение разряда U=25–36 В; длина дуги L<sub>д</sub>=10–13 мм; скорость сварки v<sub>св</sub>=33–42 м/час; расход плазмообразующего газа аргона Q<sub>Аг</sub>=2,5–2,7 л/час. Образцы сваривались без зазора, с фиксированным зазором 0,6–1,0 мм и с разделкой свариваемых кромок со стороны проплава. Расположение катода было вертикальным и наклонным с углом 20–23° от вертикальной оси. 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.

Прогнозирование геометрических характеристик зоны проплавления в зависимости от режимов сварки наиболее целесообразно выполнить комбинированным методом, включающим в себя теоретическое рассмотрение процесса проплавления с корректировкой его по полученным экспериментальным результатам [6]. В работе [6] поступление тепла в свариваемое изделие описывается полной мощностью разряда и эффективным КПД:

$$Q_э = \eta_э \cdot Q, \tag{1}$$

где Q<sub>э</sub> – эффективная мощность, поступающая в свариваемое изделие от источника нагрева; Q – полная мощность разряда; η<sub>э</sub> – эффективный КПД.

Полная мощность разряда:

$$Q = U \cdot I, \tag{2}$$

где U, I – ток и напряжение разряда.

Таким образом,

$$Q_э = \eta_э \cdot U \cdot I. \tag{3}$$

С другой стороны, тепловая мощность, поступившая в изделие, расходуется на нагрев металла сварочной ванны до температуры плавления T<sub>пл</sub>, плавление его и дальнейший перегрев до T<sub>в</sub>. С точки зрения сварки – это полезная мощность. Но наряду с мощностью, затраченной на образование сварного соединения, часть мощности тратится на нагрев всего свариваемого изделия за счет теплопроводности от границ сварочной ванны, излучение, испарением и разбрызгивание с поверхности ванны.

Полный учет всех составляющих энергетического баланса процесса сварки полым катодом невозможен и в работе [7] для решения поставленной задачи приняты следующие допущения:

– поперечное сечение столба полого катода в зоне взаимодействия имеет форму круга с диаметром, равным d<sub>0,368</sub>; удельная поверхностная мощность постоянна по сечению;

– зона проплавления представляет собой цилиндр диаметром d<sub>0,368</sub> и высотой a<sub>п</sub>, перемещающийся со скоростью v;

– расплав находится при температуре плавления;

– отвод тепла из сварочной ванны в тело свариваемого изделия осуществляется только по переднему фронту ванны;

– потери мощности на излучение, испарение и разбрызгивание отсутствуют;

– теплофизические характеристики свариваемого материала принимались согласно данным для чистого титана при нормальных условиях.

При таких допущениях мощность, затраченная на образование сварного соединения, выглядит следующим образом:

$$Q_1 = a_n \cdot d_{0,368} \cdot v \cdot \rho (cT_{пл} + L_{пл}), \tag{4}$$

где Q<sub>1</sub> – мощность, затраченная на образование сварного соединения, Вт; ρ – плотность свариваемого материала, кг/м<sup>3</sup>; c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); L<sub>пл</sub> – удельная теплота плавления, Дж/кг

Мощность, отведенная от сварочной ванны теплопроводностью,

$$Q_2 = 0,5 \cdot \pi \cdot a_n \cdot d_{0,368} \cdot \lambda \frac{dT}{dn}, \tag{5}$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\frac{dT}{dn}$  – градиент температуры в зоне теплопередачи, где

$$\frac{dT}{dn} = \left( \frac{1}{d_{0,368}} + \frac{v}{2a} \right) \cdot T_{пл}, \tag{6}$$

где a – коэффициент температуропроводности свариваемого материала

Принимая во внимание (6), выражение (5) запишется

$$Q_2 = 0,5 \cdot \pi \cdot a_n \cdot d_{0,368} \cdot \lambda \cdot T_{пл} v \left( \frac{1}{d_{0,368} \cdot v} + \frac{1}{2a} \right). \tag{7}$$

Энергетический баланс процесса сварки полым катодом после преобразований примет вид:

$$\eta_э \cdot U \cdot I = a_n \cdot d_{0,368} \cdot v \cdot M, \tag{8}$$

где M отображает теплофизические свойства свариваемого материала:

$$M = \rho (cT_{пл} + L_{пл}) + 0,5\pi \cdot \lambda \cdot T_{пл} \left( \frac{1}{d_{0,368} \cdot v} + \frac{1}{2a} \right), \tag{9}$$

Рассчитанные по (8) значения a<sub>п</sub> · d<sub>0,368</sub> отличаются от экспериментально полученных данных. Для компенсации различий между расчетной и реальной моделями процесса в формулу (8) вводится коэффициент пропорциональности K.

В этом случае выражение, связывающее параметры режима сварки полым катодом с геометрическими характеристиками проплавления, принимает вид:

$$a_n \cdot d_{0,368} = \frac{K \cdot U \cdot I}{v \cdot M} 10^6. \tag{10}$$

Таким образом, получена математическая зависимость геометрических параметров зоны проплавления от электрических параметров дуги.

**5. Результаты исследований математической модели сварки полым катодом**

Расчеты, проведенные применительно к сварке полым катодом пластин из титанового сплава ВТ6С, показали значительные отклонения результатов численных исследований от экспериментальных данных и невозможность применения указанной методики для решения задачи прогнозирования геометрических параметров сварного шва в производственных условиях [8].

Улучшить адекватность математической модели условиям проведения эксперимента можно, выполнив расчет размеров сварного соединения с учетом зависимостей теплофизических характеристик свариваемого материала от температуры [9]. Анализ работ, посвященных исследованию и систематизации данных по теплофизическим свойствам титановых сплавов [5–8], показал, что теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность в большей степени зависят от температуры, чем плотность.

В связи с этим, для титанового сплава ВТ6С на основе экспериментальных данных [7–15] методом наименьших квадратов были определены регрессионные зависимости теплофизических характеристик в диапазоне температур от  $T_0=300$  К до  $T_{пл}=1903$  К:

– теплопроводность описывается линейной зависимостью

$$\lambda(T) = 1,5194 \cdot 10^{-2} \cdot T + 3,083, \tag{11}$$

где  $T$  – температура нагрева, К;

– теплоемкость в рассматриваемом диапазоне температур определяется тремя линейными зависимостями на соответствующих температурных участках [12] (табл. 1).

Таблица 1

Регрессионные зависимости теплоемкости титанового сплава ВТ6С от температуры нагрева

Температурный участок		Регрессионная зависимость
Начальная температура $T_0$ , К	Конечная температура $T_k$ , К	
300	1240	$c_p(T) = 4,62 \cdot 10^{-1} \cdot T + 3,647 \cdot 10^2$
1240	1400	$c_p(T) = -1,015 \cdot T + 2,185 \cdot 10^3$
1400	1903	$c_p(T) = 0,297 \cdot T + 350,9$

Плотность промышленных титановых сплавов мало зависит от химического состава и практически соответствует значению для чистого титана [13]. С по-

вышением температуры до  $T_{пл}$  плотность чистого титана изменяется не более чем на 10 % [14] и в заданном диапазоне температур может быть принята величиной постоянной. Для титанового сплава ВТ6С значение плотности принимается равной  $\rho=4450$  кг/м<sup>3</sup> [13].

Коэффициент температуропроводности материалов определяется соотношением [16]:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}. \tag{12}$$

Удельная теплота плавления для титанового сплава ВТ6С составляет  $L_{пл}=337 \cdot 10^3$  Дж/кг [17].

С учетом угла наклона катода, зависимостей, приведенных в формулах (10), (11) и табл. 1, энергетический баланс процесса сварки полым катодом будет описываться уравнением:

$$\eta_b UI = d_{0,368}^p \left[ \frac{a_n}{\cos \gamma} \cdot v \cdot \left[ \rho \left( \int_{T_0}^{T_{пл}} c_p(T) dT + L_{пл} \right) \right] + \frac{0,5\pi a_n v \rho}{2 \cos \gamma} \int_{T_0}^{T_{пл}} c_p(T) dT \right] + \frac{0,5\pi a_n}{\cos \gamma} \int_{T_0}^{T_{пл}} \lambda(T) dT, \tag{13}$$

где  $d_{0,368}^p$  – расчетный диаметр проплавления на уровне 1/е от поверхности пластины с верхней стороны сварного шва, м;  $\gamma$  – угол наклона катода от вертикальной оси,  $\gamma=20^\circ$ ;  $T_0$  – начальная температура, принимается  $T_0=300$  К;  $c_p(T)$ ,  $\lambda(T)$  – температурные зависимости теплоемкости и теплопроводности, соответственно.

Для расчета геометрических параметров сварного шва предлагается определять явные значения диаметра проплавления  $d_{0,368}^p$ , в отличие от произведения  $a_n \cdot d_{0,368}$  в формуле (10). При этом высота зоны проплавления  $a_n$  принимается равной толщине пластины. Это позволит избавиться от диаметра проплавления  $d_{0,368}$  в комплексном параметре  $M$  формулы (9) и, соответственно, в правой части уравнения (10), где величина  $d_{0,368}$  не определена теоретически и требуются предварительно определенные экспериментальные его значения.

Тогда расчетные значения  $d_{0,368}^p$  будут определяться по формуле:

$$d_{0,368}^p = \frac{\eta_b UI \cos \gamma - 0,5\pi a_n \int_{T_0}^{T_{пл}} \lambda(T) dT}{a_n v \rho \left[ 1,785 \int_{T_0}^{T_{пл}} c_p(T) dT + L_{пл} \right]}. \tag{14}$$

Коэффициент пропорциональности  $K$ , используемый в предыдущей методике, позволит уточнить математическую модель процесса и связать режимы сварки полым катодом с экспериментальными данными зоны проплавления следующей зависимостью:

$$d_{0,368}^{экс} = K \cdot d_{0,368}^p, \tag{15}$$

где  $d_{0,368}^{экс}$  – экспериментальные значения диаметра проплавления на уровне 1/е от поверхности пластины с верхней стороны сварного шва, м.

Совместный анализ экспериментальных и расчетных значений диаметра проплавления (табл. 2) пока-

зал, что величина коэффициента пропорциональности  $K$  для толщины пластин  $a_n=5$  мм изменяется от 0,8327 до 1,0543, а при  $a_n=8$  мм – от 1,1799 до 1,3002. Каждое значение коэффициента  $K$  соответствует определенным режимам сварки и использование в расчетной формуле (14) его среднего значения приводит к значительным отклонениям прогнозируемой величины  $d_{0,368}^{np}$  от экспериментальных значений  $d_{0,368}^{эксп}$ .

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

Толщина пластин $a_n$ , м	Эффективный КПД $\eta$	Напряжение разряда $U$ , В	Ток разряда $I$ , В	Скорость сварки $v$ , м/с	Расчетные значения $d_{0,368}^p$ , м	Экспериментальные значения $d_{0,368}^{эксп}$ , м	Коэффициент пропорциональности $K$
5·10 <sup>-3</sup>	0,88	250	28	1·10 <sup>-2</sup>	10,05·10 <sup>-3</sup>	8,91·10 <sup>-3</sup>	88,58·10 <sup>-2</sup>
		255	28	1·10 <sup>-2</sup>	10,27·10 <sup>-3</sup>	9,15·10 <sup>-3</sup>	89,13·10 <sup>-2</sup>
		275	31	1,17·10 <sup>-2</sup>	10,58·10 <sup>-3</sup>	11,16·10 <sup>-3</sup>	105,43·10 <sup>-2</sup>
		250	28	8,61·10 <sup>-3</sup>	11,68·10 <sup>-3</sup>	9,72·10 <sup>-3</sup>	83,27·10 <sup>-2</sup>
8·10 <sup>-3</sup>	0,88	310	34	1·10 <sup>-2</sup>	9,44·10 <sup>-3</sup>	11,14·10 <sup>-3</sup>	117,99·10 <sup>-2</sup>
		310	31	1·10 <sup>-2</sup>	8,56·10 <sup>-3</sup>	11,14·10 <sup>-3</sup>	130,02·10 <sup>-2</sup>
		310	35	1·10 <sup>-2</sup>	9,73·10 <sup>-3</sup>	11,64·10 <sup>-3</sup>	119,61·10 <sup>-2</sup>

Анализ полученных результатов позволил выявить некоторую корреляцию погонной энергии процесса сварки  $Q_n = \frac{UI}{v}$  и величины коэффициента  $K$  в виде параболических функций (рис. 1):  
– при  $a_n=5$  мм

$$K_p = -677,06 \cdot 10^{-13} Q_n^2 + 102,22 \cdot 10^{-6} Q_n - 375,19 \cdot 10^{-1}, \quad (16)$$

– при  $a_n=8$  мм

$$K_p = 146,18 \cdot 10^{-13} Q_n^2 - 307,47 \cdot 10^{-7} Q_n + 173,49 \cdot 10^{-1}, \quad (17)$$

где  $K_p$  – расчетное значение коэффициента пропорциональности.

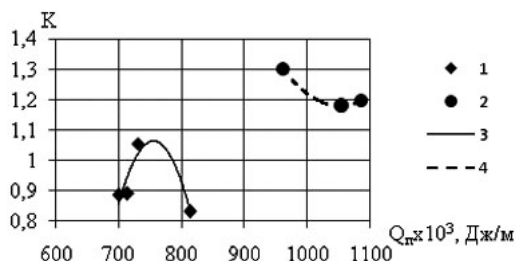


Рис. 1. Зависимость коэффициента пропорциональности  $K$  от величины погонной энергии сварки полым катодом  $Q_n$ : 1 – при  $a_n=5$  мм; 2 – при  $a_n=8$  мм; 3, 4 – полиномиальные кривые для рядов данных 1 и 2, соответственно

Получена зависимость коэффициента приведения от величины погонной энергии сварки полым катодом для двух разных толщин.

## 6. Обсуждение результатов исследований математической модели сварки полым катодом

Значения прогнозируемого диаметра проплавления  $d_{0,368}^{np}$ , рассчитанные по формуле (15) с учетом зависимостей (16), (17), отличаются от экспериментальных данных при  $a_n=5$  мм не более чем на 3 %, при  $a_n=8$  мм – 0,09 %, что вполне приемлемо для инженерных расчетов (табл. 3).

Таблица 2

Зависимости коэффициентов пропорциональности  $K_p$  от погонной энергии сварки определены применительно к конкретным условиям сварочного процесса полым катодом пластин толщиной 5 мм и 8 мм из титанового сплава ВТ6С и позволяют определять диаметр проплавления с высокой степенью точности в рассматриваемом диапазоне значений погонной энергии и режимов сварки.

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.

Таблица 3

Расчетные значения коэффициента пропорциональности  $K_p$  и прогнозируемые диаметры проплавления  $d_{0,368}^{np}$  при сварке полым катодом пластин из титанового сплава ВТ6С

Толщина пластин $a_n$ , м	Расчетный коэффициент пропорциональности $K_p$	Прогнозируемые значения $d_{0,368}^{np}$ , м	Экспериментальные значения $d_{0,368}^{эксп}$ , м	Относительная погрешность, %
5·10 <sup>-3</sup>	85,91·10 <sup>-2</sup>	8,64·10 <sup>-3</sup>	8,91·10 <sup>-3</sup>	3,02
	94,98·10 <sup>-2</sup>	9,75·10 <sup>-3</sup>	9,15·10 <sup>-3</sup>	6,56
	102,34·10 <sup>-2</sup>	10,83·10 <sup>-3</sup>	11,16·10 <sup>-3</sup>	2,93
	83,50·10 <sup>-2</sup>	9,75·10 <sup>-3</sup>	9,72·10 <sup>-3</sup>	0,28
8·10 <sup>-3</sup>	118,10·10 <sup>-2</sup>	11,14·10 <sup>-3</sup>	11,14·10 <sup>-3</sup>	0,09
	130,11·10 <sup>-2</sup>	11,14·10 <sup>-3</sup>	11,14·10 <sup>-3</sup>	0,07
	119,72·10 <sup>-2</sup>	11,65·10 <sup>-3</sup>	11,64·10 <sup>-3</sup>	0,09

Разработанная модель позволяет проводить как прямые расчеты параметров режима сварки – так и обратные, по заданному режиму сварки и материалу прогнозировать ожидаемую величину геометрических параметров зоны проплавления.

В дальнейшем планируется исследование влияния различной разделки кромок образцов на коэффициент пропорциональности.

## 7. Выводы

Проведенные исследования показали, что комбинированный метод, основанный на совместном анализе результатов теоретических и экспериментальных исследований, позволяет с достаточной степенью точности прогнозировать геометрические параметры зоны про-

плавления для технологии сварки полым катодом титановых шаробаллонов и состоит из следующих этапов.

1. Вывод уравнения, связывающего технологические параметры сварки с геометрическими характеристиками проплавления, с учетом зависимостей теплофизических характеристик свариваемого материала от температуры.

2. Расчет геометрических размеров зоны проплавления.

3. Определение коэффициентов пропорциональности и выявление возможных корреляционных зависимостей их значений от режимов сварки.

4. Расчет прогнозируемых геометрических параметров зоны проплавления при изготовлении шаробаллонов методом сварки полым катодом в вакууме.

Для реализации данного способа 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 величины коэффициента пропорциональности  $K_p$ , определяемого в зависимости от режимов сварки, и расчетных значений геометрических параметров зоны проплавления  $d_{0,368}^p$ . Данная методика применима как для метода сварки полым катодом, так и для других видов сварочных процессов с высококонцентрированными источниками теплового воздействия.

### Литература

1. Южмаш: Емкости, работающие под высоким давлением (шаробаллоны) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.yuzhmash.com/production/index/ptn?id=32>
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. Krizan, J. Analysis of the strain-induced martensitic transformation of retained austenite in cold rolled micro-alloyed TRIP steel [Text] / J. Krizan, B. C. De Cooman // Steel Research International. – 2008. – Vol. 79, Issue 7. – P. 513–522.
5. Senkara, J. Contemporary car body steels for automotive industry and technological guidelines of their pressure welding [Text] / J. Senkara // Welding International. – 2013. – Vol. 27, Issue 3. – P. 184–189. doi: 10.1080/09507116.2011.600028
6. Пентегов, И. В. К теории метода тепловых источников, используемого при анализе тепловых процессов в электротехнических системах [Текст] / И. В. Пентегов. – Электротехнические и информационные комплексы и системы, №3, т. 10, 2014. С. 5 – 15.
7. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах [Текст]: справочник / В. Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
8. 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.
9. 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.
10. Zhang, M. Continuous cooling transformation diagrams and properties of micro-alloyed TRIP steels [Text] / M. Zhang, L. Li, R. Y. Fu, D. Krizan, B. C. De Cooman // Materials Science and Engineering A. – 2006. – Vol. 438-440. – P. 296–299. doi: 10.1016/j.msea.2006.01.128
11. 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, Issue 3. – P. 2452–2459. doi: 10.1088/0022-3727/41/3/035201
12. Pavlyk, V. Modelling and direct numerical simulation of dendritic structures under solidification conditions during fusion welding [Text]: PhD thesis / V. Pavlyk. – ISF, RWTH Aachen, Germany, 2004. – 175 p.
13. Лариков, Л. Н. Структура и свойства металлов и сплавов. Тепловые свойства металлов и сплавов [Текст]: справочник / Л. Н. Лариков, Ю. Ф. Юрченко. – Киев : Наукова думка, 1985. – 438 с.
14. Пелецкий, В. Э. Теплофизические свойства титана и его сплавов [Текст]: справочник / В. Э. Пелецкий, В. Я. Чеховской, Э. А. Бельская; за ред. А. Е. Шейндлин. – М.: Металлургия, 1985. – 102 с.
15. Валиев, Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. [Текст] / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
16. Wang, X. D. Microstructure and mechanical properties of microalloyed high-strength transformation-induced plasticity steels [Text] / X. D. Wang, B. X. Huang, L. Wang, Y. H. Rong // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2008. – Vol. 39, Issue 1. – P. 1–7. doi: 10.1007/s11661-007-9366-4
17. Рахманкулов, М. М. Технология литья жаропрочных сплавов [Текст] / М. М. Рахманкулов, В. М. Паращенко. – М.: «Интермет инжиниринг», 2000. – 463 с.