

гидроцилиндра $v_M = 0,0328$ м/с и из скорости, созданной передним гидроцилиндром $v_{1n} = 0,12$ м/с. Из точки M_1 добавим отрезок до точки M_2 , соответствующий скорости выдвигания штока переднего цилиндра $v_{1n} = 0,12$ м/с параллельный направления движения штока переднего гидроцилиндра KM . В точке M_2 проведем линию, перпендикулярную KM . Известно также значение скорости точки L $v_L = 0,0657$ м/с. В точке L_1 проведем линию, перпендикулярную KL . В пересечении двух линии находим точку k . Абсолютная скорость точки K равна длине отрезка pk из плана скоростей, умноженной на масштаб скорости. На плане скоростей найдем значение абсолютной скорости точки K

$$v_{k1} = p_1 k_1 \cdot \mu_v = 7639 \cdot 0,00002 = 0,152 \text{ м/с.}$$

Скорость точки J , принадлежащей переднему рычагу LJ находим, строя в плане скоростей линию начиная от точки l_1 через точки k_1 до точки j_1 .

Абсолютная скорость точки J равна

$$v_{j1} = p_1 j_1 \cdot \mu_v = 12007 \cdot 0,00002 = 0,24 \text{ м/с.}$$

Далее проводим линию от p_1 до j_1 . Используя метода подобия находим скорости искомой точки R . Для этого продолжаем линию $p_1 j_1$ от точки полюса p_1 через точки j_1 до точки r_1 , поскольку точка R находится на прямой с точкой J и неподвижной точкой G . Измеряя длину отрезка $p_1 r_1$ и умножая на масштаб скорости находим скорость точки R

$$v_{r1} = p_1 r_1 \cdot \mu_v = 15996 \cdot 0,00002 = 0,32 \text{ м/с.}$$

Выводы

1. Составлены планы положений бульдозерного рабочего оборудования с рычажным механизмом выдвигания отвала для диапазона изменений угла поворота отвала до 21 градус в плане.
2. Определены графическим методом скорости характерных точек рычажного механизма выдвигания отвала бульдозерного рабочего оборудования для различных положений отвала.

Список литературы

1. А.С. № 1640293 СССР МКИ Е 02 F 3/76. Бульдозер-террасер / Ж.Ж.Тургумбаев, А.И.Джылкычиев, К.И.Раймкулов и др. Опубл. 07.04.91. БИО № 13.
2. Тургумбаев Ж.Ж., Урманбаев С.И. Бульдозерное оборудование для расчистки горных дорог от снежных и каменных завалов //Наука и новые технологии. – 2000, № 2. – С. 131-133.

References

1. A.S. No. 1640293 the USSR, MKI E 02 F 3/76. Bulldozer-terracer / J.J.Turgumbaev, A.I.Jylkychiev, K.I.Raimkulov, etc. Publ. 07.04.91. BIO No. 13.
2. Turgumbaev J.J., Uрманбаев S.I. Bulldozer equipment for clearing of mountain roads from snow and stone rubble//Science and new technologies. - 2000, No. 2. - P. 131-133.

УДК 537.527

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Жайнаков Аманбек Жайнакович, д.ф.-м.наук, академик, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: jainakov47@mail.ru

Султангазиева Рена Турдубековна, к.ф.-м.н., доцент, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: renasultangazieva@mail.ru

Цель статьи – развитие интегрированной модели взаимодействия электрической дуги и расплавленного металла сварочной ванны. На основании литературного обзора существующих математических моделей задач электродуговой обработки материалов корректируются условия на границе «плазма-жидкий металл»

Ключевые слова: электродуговая плазма, МГД уравнения, сварочная ванна, термокапиллярная конвекция, деформация свободной поверхности, математическое моделирование, плазмообразующий газ, эффект Марангони

THE MODERN APPROACHES FOR SOLVING TASKS OF PLASMA MATERIAL PROCESSING

Purpose of this article is to develop uniform model of interaction between the electric arc and molten weld pool. Based on a literature review of existing mathematical models of electric arc, materials processing the boundary condition of interface "liquid metal-plasma" are corrected

Keywords: electro arc plasma, MHD equations, weld pool, thermocapillary convection, deformation of the free surface, mathematical modeling, gas which generates plasma Marangoni effect

Потоки электродуговой плазмы нашли широкое применение в современных методах обработки материалов. Электродуговая сварка один из наиболее эффективных и широко распространенных процессов получения прочных и качественных соединений в машиностроении и строительстве, в газовой и нефтехимической промышленности. Это сложный технологический процесс, включающий в себя и мощные источники тепла, гидродинамические процессы, наличие газовой фазы, жидкой и твердой фаз, теплообменные, диффузные процессы и испарение, химические и металлургические процессы. Все эти процессы в совокупности влияют на качество сварных соединений. И потому, дальнейшее совершенствование технологий сварки требует высокоэффективных методов моделирования процессов электродуговой сварки. Получение количественной связи между процессами в дуге и сварочной ванне позволят адекватно предсказать форму и размеры сварочного шва, качество шва, вероятность образования дефектов.

Первичными являются процессы в электрической дуге, создающей тепловой поток и давление на поверхность металла. В процессе сварки плавлением, течение жидкости определяет форму жидкой ванны и распределение температуры в детали. Эти факторы определяют такие свойства материала, как микроструктура, твердость и шероховатость поверхности. В зависимости от времени пребывания металла в критическом диапазоне температур, когда происходят структурные изменения, определяются временные и остаточные деформации и напряжения разрушения, образования горячих трещин. Свойства металла сварного шва в значительной степени зависят от процессов кристаллизации, химического состава, микроструктуры первичной кристаллизации. Чтобы попытаться учесть все это многообразие процессов и их взаимное влияние друг на друга, в последние годы появилась тенденция рассмотрения этих процессов в тесной связи с процессами тепломассопереноса в жидкой сварочной ванне, что позволяет получить связанную картину этих процессов в различных зонах металла сварного шва.

Цель данной работы – на основе обзора научной литературы в области электродуговой сварки и анализа физических процессов, протекающих на границе «плазма-жидкий металл» разработать математическую модель, описывающую наиболее полно процессы в системе «дуга-обрабатываемое изделие» с учетом их взаимного влияния друг на друга.

В работе [1,6] предлагается модель совместного рассмотрения области электродуговой плазмы и обрабатываемого изделия. Физические процессы в столбе электродугового разряда и взаимодействующего с этим разрядом жидкого металла описываются одной и той же системой уравнений магнитной гидродинамики. Указанная система уравнений объединяет уравнение неразрывности, Навье-Стокса, энергии, уравнения Максвелла и закон Ома:

$$\operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0; \quad (1)$$

$$\rho(\vec{V} \operatorname{grad}) \vec{V} = \rho \vec{g} + \vec{E} \operatorname{div} \vec{D} + \vec{j} \times \vec{B} - \operatorname{grad} \left(P + \frac{2}{3} \mu \operatorname{div} \vec{V} \right) + 2 \operatorname{div}(\mu \dot{S}); \quad (2)$$

$$\rho \vec{V} \operatorname{grad} \left(h + \frac{1}{2} V^2 \right) = \vec{j} \vec{E} - q + \vec{V} \operatorname{grad} P + \operatorname{div} \left(2\mu \dot{S} - \frac{2}{3} \mu \operatorname{div} \vec{V} + \frac{\lambda}{c_p} \operatorname{grad} h \right); \quad (4)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0, \quad \operatorname{rot} \vec{H} = 0, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad (5)$$

$$\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B} = \frac{\vec{j}}{\sigma}; \quad (6)$$

Система дополняется соотношениями:

$$\sigma = \sigma(T, P), \quad \lambda = \lambda(T, P), \quad \mu = \mu(T, P), \quad \rho = \rho(T, P), \quad q = q(T, P), \\ c_p = c_p(T, P), \quad h = h(T, P); \quad \vec{B} = \mu_0 \vec{H}, \quad \vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}; \quad (7)$$

Где \vec{V} - вектор скорости; P - давление; T - температура плазмы; \vec{g} - вектор ускорения свободного падения; \vec{j} - плотность тока, \vec{E} - вектор напряженности электрического поля, \vec{H} вектор напряженности магнитного поля, \vec{B} -

вектор магнитной индукции, \vec{D} - вектор электрической индукции, μ_0 - магнитная постоянная, ϵ_0 - электрическая постоянная, ρ - плотность плазмы, c_p - теплоемкость при постоянном давлении, μ - вязкость, λ - теплопроводность плазмы, q - излучательная способность, σ - электропроводность, h - энтальпия, \vec{S} - тензор скоростей деформации с компонентами:

$$S_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right), \quad (8)$$

где V_i, V_k -компоненты вектора \vec{V} , x_k, x_i - координаты, $1, k=1, 2, 3$. Конкретный вид тензора скоростей деформации зависит от используемой системы координат.

Стандартное преобразование позволяет записать данную систему МГД-уравнений в цилиндрических координатах как систему из четырех уравнений относительно переменных ω, h, ψ, χ , вводя скалярные переменные:

$\omega = \frac{W_\varphi}{r}$, $\psi = \phi_\varphi r$, $\chi = H_\varphi r$, где ω - напряженность вихря, ψ - функция тока, χ - функция электрического тока, которые в случае цилиндрической системы координат в случае осевой симметрии определяются соотношениями:

$$\omega = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right);$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial r} &= \rho u r, & -\frac{\partial \psi}{\partial z} &= \rho v r; \\ \frac{\partial \chi}{\partial r} &= r j_z, & -\frac{\partial \chi}{\partial z} &= r j_r; \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда исходная система запишется в следующем каноническом виде:

$$\alpha \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\varphi \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\varphi \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[b \frac{\partial}{\partial z} (c\varphi) \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[b \frac{\partial}{\partial r} (c\varphi) \right] + er = 0; \quad (10)$$

где φ - искомая функция, принимающая значения ω, ψ, h, χ ;

a, b, c, e - нелинейные коэффициенты, соответствующие каждому из уравнений. Единая форма записи позволяет при решении системы уравнений использовать один и тот же алгоритм расчета. Для решения полученной системы дифференциальных уравнений необходимо задать граничные условия для данных функций. Поскольку уравнения системы являются уравнениями эллиптического типа, то граничные условия должны быть заданы по всему контуру, охватывающему расчетную область.

Граничные условия на границе «плазма-жидкий металл» поставлены следующим образом:

$$\frac{1}{\rho_p} \frac{\partial \psi_p}{\partial z} = \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial \psi_m}{\partial z}, \quad \psi = 0, \quad \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial z} = \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial z}, \quad \frac{\partial \chi_p}{\partial z} = \frac{\partial \chi_m}{\partial z} = 0; \quad (11)$$

Граничное условие для радиальной компоненты скорости на границе «плазма-жидкий металл», которая является плоской, учитывает вязкое взаимодействие между плазмой и жидким металлом, а также термокапиллярную конвекцию:

$$\mu_p \frac{\partial v_p}{\partial z} = \mu_m \frac{\partial v_m}{\partial z} - \frac{\partial \alpha}{\partial r}, \quad (12)$$

где α - коэффициент натяжения жидкого металла; преобразуя данное граничное условие для «вихрь-функции тока»:

$$\mu_p \omega_p = \mu_m \omega_m - \frac{\partial \alpha}{\partial r}, \quad (13)$$

В объеме сварочной ванны радиусом R и глубиной проплавления h , форма которой определяется изотермой плавления T_{plav} , находится жидкий металл, поведение которой описывается МГД уравнениями (1-7). Форма поверхности жидкого металла является плоской. Основными причинами, определяющими движение металла в сварочной ванне считаем:

- вязкие силы между радиально растекающимся у поверхности металла потоками плазмы и жидким металлом;
- тепловая конвекция, возникающая в неравномерно нагретых жидкостях;
- термокапиллярная конвекция, вызванная зависимостью коэффициента поверхностного натяжения жидкости от температуры;
- собственное магнитное поле протекающего через металл электрического тока.

Среди гидродинамических процессов, происходящих в жидкой фазе значительный интерес представляет эффект Марангони, то есть движение жидкости, вызванное зависимостью поверхностного натяжения от температуры. Возникновение градиента поверхностного натяжения может быть вызвано градиентом концентрации активирующих веществ или градиентом температуры. В последнем случае такую конвекцию называют термокапиллярной.

В работе [7] отмечено, что градиент поверхностного натяжения имеет сильное влияние на направление течений жидкого металла в сварочной ванне. Когда данный коэффициент отрицательный, термокапиллярные потоки направлены от центра ванны к ее краям, увеличивая ширину сварочной ванны. В случае, когда градиент поверхностного натяжения положителен, термокапиллярные течения направлены вглубь ванны, формируя более глубокую, но узкую ванну. Причем сила вязкого трения заметно зависит от химического состава защитного газа. Обычно, $\frac{\partial \alpha}{\partial T} < 0$ для чистых металлов, но может стать положительной величиной при введении поверхностно активных веществ, таких как сера и кислород (Рис.1).

Более того, известные оценки скорости течения жидкого металла, возникающего вследствие воздействия сил поверхностного натяжения и трения паров металла в канале, показывают, что течение в ванне для режимов сварки, используемых на практике, может быть турбулентным [8]. В результате численных расчетов было установлено, что учет термокапиллярной конвекции приводит к «грибовидной форме» сварочной ванны.



Рис.2 Направление потоков жидкого металла в сварочной ванне при воздействии различных сил

В нашей модели было принято допущение, что граница раздела между дугой и ванной остается плоской. В реалии, под действием сварочной дуги происходит деформация поверхности сварочной ванны. Для определения деформации свободной поверхности расплава существуют два основных подхода: подход Судника и Ерофеева для сварки неплавящимся электродом [7] и плазменной сварки [9]. Поверхность ванны деформируется под действием силы давления дуги и тяжести, которые уравновешиваются силой поверхностного натяжения, то есть равновесное расположение этой поверхности определяется уравнением равновесия давлений: капиллярного p_c (сил поверхностного натяжения), внутреннего p_b , гравитационного p_G , плазмы дуги p_a . Координаты свободной поверхности расплава при небольших деформациях определяется из дифференциального уравнения движения свободной поверхности расплава:

$$\pm \alpha(T) \left\{ \frac{\partial z^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right\} = \rho g |z| - P_{vap}(T) + \lambda_L \tag{14}$$

Исходя из этой же модели в работе [2] дано более общее уравнение:

$$\alpha(T) \nabla \left(\frac{\Delta z}{\sqrt{1+(\nabla z)^2}} \right) - \rho gh = \frac{P_{arc} + P_{vap}}{\sqrt{1+(\nabla z)^2}} + \lambda_L \tag{15}$$

где h - высота столба жидкого металла, P_{vap} - давление отдачи паров, λ_L - постоянная, имеющая смысл внутреннего давления расплава вследствие деформации его поверхности, $\frac{\Delta z^2}{\sqrt{1+(\nabla z)^2}}$ - кривизна поверхности расплава. P_{vap} - реактивное давление испаряющегося металла ванны под действием дуги определяется по температуре в произвольной точке поверхности расплава:

$$P_{vap} = Ae^{\frac{B}{T} + C} \tag{16}$$

где A, B, C - коэффициенты, зависящие от типа металла [3].

Второй подход представлен в работе [10]: под действием результирующих сил поверхность сварочной ванны деформируется и принимает форму с минимальной полной энергией. В работе показано, что решение полученной вариационной задачи может быть получены с использованием следующего уравнения Эйлера:

$$\alpha(T) \left\{ \frac{r z_{rr} + z_r (1 + z_r^2)}{r (1 + z_r^2)^{3/2}} \right\} = \rho g |z| - P_{arc} + \lambda_L \tag{17}$$

где λ_L - множитель Лагранжа (или внутреннее давление расплава)

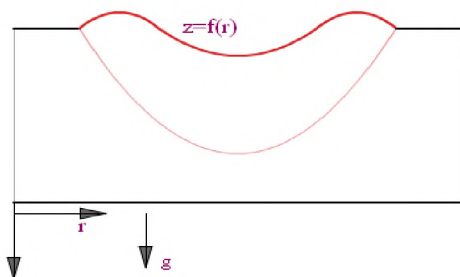


Рис.2 Схематическое представление деформации поверхности сварочной

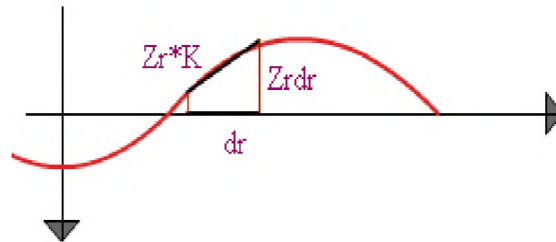


Рис.3 Геометрическое соотношение деформации поверхности, где $K = \sqrt{1 + Z_r^2}$ - кривизна ванны

Для решения уравнения необходимо определить внутреннее давление в расплаве, которое определяется согласно уравнению сохранения массы расплава. Решение уравнения равновесия давлений на поверхности сварочной ванны выполняется в цикле, внутри которого решается уравнение равновесия давлений и итерационно изменяется внутреннее давление в расплаве до достижения баланса массы. Расположение поверхностей сварочной ванны определяется в ходе решения уравнений модели.

Следующим значительным шагом в корректировке граничных условий на поверхности «плазма-жидкий металл» является исследование процессов испарения металла с поверхности анода. Присутствие паров материала анода в плазме сварочной дуги оказывает существенное влияние на ее основные физические свойства (теплофизические характеристики, коэффициенты переноса, оптические свойства), определяет тепловое и динамическое воздействие сварочной дуги на поверхность (форма поверхности, размеры сварочной ванны). В работе [4] разработана математическая модель испарения анода из бинарного сплава в условиях дуговой сварки.

Тепловой поток, выпариваемый из центральной области сварочной ванны, оценивается следующим уравнением:

$$q_{evap} = W_v h_{fg} \quad (18)$$

где h_{fg} - удельная теплота испарения, W_v - скорость испарения,

$$\log W_v = A_v + \log P_{atm} - 0,5 \log T \quad (19)$$

где P_{atm} является давление, при котором происходит испарение, A_v - постоянная [11].

Для моделирования изменения фазы «жидкий металл-твердый», соотношение между энтальпией и температурой в работе [12] учитывается следующее:

$$h = \begin{cases} \rho_s C_s T & T < T_s \\ h(T_s) + h_{sl} \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ h(T_l) + \rho_l C_l (T - T_l) & T_l < T \end{cases} \quad (20)$$

s -граница «твердый металл», l - граница «жидкий металл», h_{sl} - удельная теплота плавления металла

В работе [13] на границе «плазма-жидкий металл» поставлены следующие условия :

$$\begin{aligned} Q &= j_e \varphi_a - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \\ S_p - S_m + \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r} &= 0 \\ P_p - P_m + \alpha k &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Граница плоская. Электрод, дуга и обрабатываемое изделие включаются в расчетную область и решаются согласовано. Изучено влияние состава защитного газа на свойства дуги и сварочную область. Изучено испарение металла из сварочной ванны и диффузия паров металла в плазменную дугу. Показано, что эффект паров металла может быть значительным, так как повышается радиационное излучение и уменьшается плотность тока в области изделия за счет увеличения электропроводности при низких температурах.

Таким образом, обзор вышеуказанных работ, позволяет скорректировать граничные условия на границе «плазма электрической дуги – жидкий металл сварочной ванны», учесть влияние давления дуги на форму и размеры сварочной ванны, учесть процессы испарения с поверхности расплавленного металла, что позволит разработать более полную математическую модель.

Список литературы

1. Жайнаков А.Ж., Султангазиева Р.Т., Усенканов Дж.О. О влиянии термокапиллярной конвекции на параметры расплавленного электрической дугой металла, Доклады 3 традиционной казахстанско-российской научно-практической конференции «Математическое моделирование научно-технологических и экологических проблем в нефтегазодобывающей промышленности», 19-20 сентября 2000, Алматы
2. Дилтай У., Дикшев И., Мокров О., Павлык В. Моделирование процесса и имитационные программы для сварки в активных и инертных газах. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах» Сборник трудов международной конференции. - Крым, Украина, сентябрь, 2002
3. Полосков С.И. Виртуальная модель формирования швов в процессе орбитальной tig-сварки. Практическое применение имитационного и комплексного моделирования и средств автоматизации моделирования. Секция 3. - Москва, 2005
4. Семенов И.Л., Кривцун И.В., Зельниченко А.Т. Исследование процессов испарения бинарных сплавов в условиях дуговой сварки. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». Сборник трудов Шестой международной конференции. -Крым, Украина, май, 2012
5. Судник В.А., Павлык Д.А. Термогидродинамическая модель сварочной ванны и процесса сварки неплавящимся электродом. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». Сборник трудов пятой международной конференции. -Крым, Украина, май, 2010
6. Jainakov A., Usenkanov J., Sultangazieva R. Onjoint modeling of processes in electric arc plasma and melted metal. 6 general assembly of federation of engineering institutions of Islamic countries, 27-30 June-1999, Almaty

7. Abderrazak Traidia. Multiphysics modelling and numerical simulation of GTA weld pools. PhD Thesis – 2011
8. Choo R.T., Szekely J. The possible role of turbulence in GTA weld pool behavior // Welding J. Res.
9. Sudnik V.A. Phenomenological simplification of hydrodynamic problems of the weld pool and validation of such models. Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах. Сборник трудов пятой международной конференции, Крым, Украина, 28 мая-2010
10. Kim S. -D., Na S. -J. Effect of Weld Pool Deformation on Weld Penetration in Stationary Gas Tungsten. Arc Welding, Welding research supplement, May-1992
11. Choi. M and Greif R. A study of the heat transfer during arc welding with applications to pure metals or alloys and low or high boiling temperature materials, Numer. Heat Transfer, 11, 2004
12. Cho M.H., Lim Y.S., Farson D.F. Simulation of weld pool dynamics in the stationary pulsed Gas Metal Arc Welding process and final shape. Welding Research, Supplement to the Welding journal, December -2006
13. Manabu Tanaka, Kentaro Yamamoto, Shinichi Tashiro and Lowke J. Cfd modelling of arc welding –the importance of the arc plasma. Seventh international conference on cfd in the minerals and process industries CSIRO, Melbourne, Australia, December- 2009

References

1. Zhaynakov AZ, Sultangazieva RT, Usenkanov Dzh.O. On the influence of thermocapillary convection on the parameters of the electric arc molten metal Reports 3 traditional Kazakh-Russian scientific-practical conference "Mathematical modeling of scientific and technological and environmental problems in the oil and gas industry", 19-20 September 2000, Almaty
2. Dilthey Y., I. Dikshit, wet O. Pavlik V. Modelirovanie process and simulation program for welding in active and inert gases. "Mathematical modeling and information technologies in welding and allied processes" Proceedings of the International Conference. - Crimea, Ukraine, September 2002
3. Poloskov SI The virtual model of the joints in the orbital tig- welding, the practical application of simulation and complex modeling and automation modelirovaniya. Sektsiya 3. - Moscow, 2005
4. Семенов И.Л., Кривцун И.В., Зельниченко А.Т. Исследование процессов испарения бинарных сплавов в условиях дуговой сварки. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». Сборник трудов Шестой международной конференции. -Крым, Украина, май, 2012
5. Судник В.А., Павляк Д.А. Термогидродинамическая модель сварочной ванны и процесса сварки неплавящимся электродом. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах». Сборник трудов пятой международной конференции. -Крым, Украина, май, 2010
6. Jainakov A., Usenkanov J., Sultangazieva R. On joint modeling of processes in electric arc plasma and melted metal. 6 general assembly of federation of engineering institutions of Islamic countries, 27-30 June- 1999, Almaty
7. Abderrazak Traidia. Multiphysics modelling and numerical simulation of GTA weld pools. PhD Thesis - 2011
8. Choo RT, Szekely J. The possible role of turbulence in GTA weld pool behavior // Welding J. Res.
9. Sudnik V.A. Phenomenological simplification of hydrodynamic problems of the weld pool and validation of such models. Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах. Proceedings of the Fifth International Conference, Crimea, Ukraine, May 28 2010
10. Kim S. -D., Na S. -J. Effect of Weld Pool Deformation on Weld Penetration in Stationary Gas Tungsten. Arc Welding, Welding research supplement, May- 1992
11. Choi. M and Greif R. A study of the heat transfer during arc welding with applications to pure metals or alloys and low or high boiling temperature materials, Numer. Heat Transfer, 11, 2004
12. Cho M.H., Lim Y.S., Farson D.F. Simulation of weld pool dynamics in the stationary pulsed Gas Metal Arc Welding process and final shape. Welding Research, Supplement to the Welding journal, December -2006
13. Manabu Tanaka, Kentaro Yamamoto, Shinichi Tashiro and Lowke J. Cfd modelling of arc welding –the importance of the arc plasma. Seventh international conference on cfd in the minerals and process industries CSIRO, Melbourne, Australia, December- 2009

УДК 669.35.074.669.539.5

ПРОБЛЕМЫ ШТАМПОВКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И ИХ РЕШЕНИЕ

Машеков Серик Акимович, д.т.н., профессор, КазНТУ им. К.И.Сатпаева, Казахстан, г. Алматы,
e-mail: mashkov.1957@mail.ru

Нурахметова Кулзира Кумаргалиевна, аспирант, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, г. Бишкек,
e-mail: nurahmetova52@mail.ru

В данной статье рассматриваются проблемы штамповки титановых сплавов. Для получения