

УДК 519.6:621.791.725

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ПОРИСТОЙ И МОНОЛИТНОЙ ТИТАНОВЫХ ПЛАСТИН¹

©2023 г. В.Н. Попов, А.Н. Черепанов

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск
E-mail: popov@itam.nsc.ru*

Поступила в редакцию 15 августа 2022 г.

После доработки 3 октября 2022 г. принята к публикации 19 октября 2022 г.

Выполнено численное моделирование нестационарных процессов при лазерной сварке встык пластины из пористого титана и пластины монолитного (непористого) титана. Рассмотрено влияние положения лазерного луча относительно свариваемых поверхностей на качество получаемого соединения и геометрические характеристики шва. Рассчитанные показатели сварных соединений пористой и монолитной пластин удовлетворительно согласуются с результатами физических экспериментов.

Ключевые слова: пористые металлы; лазерная сварка; численное моделирование

Длительное время существующий значительный интерес к пористым металлам вызван тем, что они, сохраняя основные достоинства исходного материала, обеспечивают рекордно высокое соотношение прочности конструкций к их весу и в результате активно применяются в авиа-, кораблестроении, гражданском строительстве и ряде других отраслей промышленности. В перспективе пористые сплавы в зависимости от величины пористости и своих уникальных свойств могут стать основными конструкционными материалами [1—8]. В то же время одно из препятствий широкого применения пористых металлов вызвано сложностью получения прочного соединения разных конструкций в единое целое. Разработка эффективных технологий соединения подобных материалов будет важным шагом для расширения их применения в промышленности [6, 9].

Из разработанных способов соединения пористых металлов, например с использованием болтов или клепок, склеиванием, пайкой или диффузионной сваркой, наиболее перспективной признана лазерная сварка. В работе [5] приведены разные стратегии использования сварки лазерным лучом для

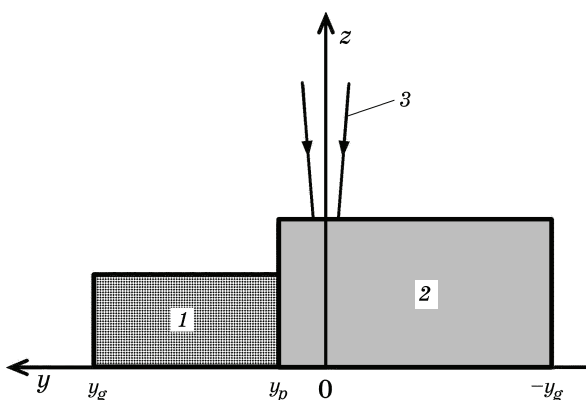
сборки конструктивных элементов из пористых металлов для получения соединений с оптимальной геометрией шва и максимальной прочностью. Обзор методов соединения металлических пористых материалов с использованием лазерной сварки с присадочным металлом и без него представлен в работе [6], а в работе [10] показана высокая эффективность использования монолитных промежуточных прокладок при лазерной сварке пористых пластин для заполнения объема пор расплавом. Экспериментально определена возможность получения прочных соединений при правильно выбранных размерах прокладок и режимах сварки. Вместе с тем указывается на затруднения при выборе рациональных режимов и технологических приемов для получения качественных сварных соединений. Поэтому необходимо проведение как дополнительных экспериментальных исследований, так и численного моделирования для получения новой информации о процессах при сварке пористых металлов. Результаты, полученные при термодинамических расчетах, могут быть полезны для получения оптимальных по качеству сварных соединений.

В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования, которые

¹Работа выполнена в рамках государственного задания (№121030500137-5).

иллюстрируют особенности сварки встык пластины из пористого металла с более толстой пластиной монолитного (непористого) металла. Сформулирована математическая модель и рассматривается нестационарный теплоперенос в пластинах при воздействии энергии лазерного излучения: разогрев и плавление металла, образование парогазового канала, заполнение пространства пор расплавом, формирование верхней поверхности сварного шва, а также охлаждение и затвердевание расплава. Исследуется влияние траектории перемещения лазерного луча относительно свариваемых поверхностей на геометрические характеристики получаемых соединений. В качестве исходных параметров для расчетов использованы условия экспериментальных исследований [10]. Представлены результаты проведенных физических экспериментов, подтверждающие адекватность и достоверность предложенной модели.

Математическая модель. Рассматривается лазерная сварка встык пластины пористого металла с более толстой пластиной монолитного металла. Координатные оси декартовой системы x и y лежат в плоскости нижних поверхностей свариваемых пластин (фиг. 1). Лазерный луч, направленный параллельно оси z на верхнюю поверхность монолитной пластины на некотором расстоянии y_p от ее кромки, перемещается вдоль координаты x с постоянной скоростью v . Центр фокального пятна луча располагается на уровне нижней поверхности пластины и движется вдоль прямой $(x, 0, 0)$. Под воздействием энергии лазерного излучения материал обеих пластин вблизи их плотно соединен-



Фиг. 1. Схема сварки пластин разной толщины в плоскости (y, z) : 1 — пористая пластина; 2 — монолитная пластина; 3 — луч лазера.

ных торцевых поверхностей плавится. При разогреве расплава выше температуры кипения в результате его испарения образуется парогазовый канал. Для упрощения задачи полагаем, что теплофизические характеристики материала пластин не зависят от температуры, их значения в жидком и твердом состояниях постоянны, однако связаны с величиной пористости металла. Значение коэффициента теплопроводности в жидком металле учитывает влияние конвективного теплопереноса. Плавление и затвердевание металла — процессы, происходящие при температуре T_s , а фазовый переход описывается в приближении Стефана [11].

Изменение температурного поля в твердом, жидком и пористом состояниях материала пластин описывается нестационарным уравнением теплопереноса;

$$c_{V_i} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_i \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_i \frac{\partial T}{\partial z},$$

$$0 \leq x \leq x_g, \quad -y_g \leq y \leq y_g, \quad 0 \leq z \leq z_g(x, y, t),$$

где T — температура; t — время; $c_V = c_p \rho$; ρ — плотность; c_p — удельная теплоемкость; λ — коэффициент теплопроводности; индексы $i = 1, 2, 3$ — соответствуют жидкому, твердому и пористому состояниям материала соответственно; $c_{V_3} = c_{V_2}(1 - m_p)$, $\rho_3 = \rho_2(1 - m_p)$, $\lambda_3 = \lambda_2(1 - m_p)$; m_p — пористость материала свариваемой пластины; x_g, y_g — координаты границ рассматриваемой области вдоль осей x и y соответственно (фиг. 1), $z_g(x, y, t)$ — функция, описывающая верхнюю поверхность системы непористая пластина — пористая пластина.

При плавлении либо затвердевании металла скорость перемещения w_n каждой точки границы расплав/твердая фаза определяется условием

$$kw_n = \lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right|_{T_s^+} - \lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right|_{T_s^-},$$

где $\mathbf{n}$ — единичный вектор нормали, k — удельная теплота плавления металла. В случае плавления пористого материала используется соотношение

$$(1 - m_p)kw_n = \lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right|_{T_s^+} - \lambda_3 \left. \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right|_{T_s^-}.$$

На поверхности соприкосновения монолитной и пористой пластин $y = y_p$, $0 \leq x \leq x_g$, $0 \leq z \leq h_p$

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{y_p^-} = \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{y_p^+}, \quad T|_{y_p^-} = T|_{y_p^+},$$

$$T|_{y_p^+} < T_s, \quad i = 1, 2;$$

а после выполнения условия $T|_{y_p^+} \geq T_s$

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{y_p^-} = \lambda_i \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{y_p^+}, \quad T|_{y_p^-} = T|_{y_p^+}, \quad i = 1, 2.$$

На свободных поверхностях свариваемых пластин и сварного шва граничные условия записываются в виде

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \alpha(T_c - T), \quad i = 1, 2, 3,$$

где $\alpha = (\alpha_0 + \alpha_c)$, α_c — коэффициент конвективной теплоотдачи, $\alpha_0 = \varepsilon \sigma_0(T^2 + T_c^2)(T + T_c)$; T_c — температура окружающей среды; σ_0 — постоянная Стефана-Больцмана, ε — степень черноты материала пластин.

На верхнюю поверхность монолитной пластины толщиной h_m и, возможно, частично на верхнюю поверхность пористой пластины толщиной h_p воздействует энергия лазерного луча через пятно радиусом r_H . Плотность интенсивности энергии внутри луча описывается распределением Гаусса. В начальный момент времени ($t=0$) центр пятна находится в точке с координатой $\{x_0, 0, z_g(x_0, 0, 0)\}$, $z_g(x, y, 0) = h_m$, $0 \leq x \leq x_g$, $-y_g \leq y \leq y_p$, $x_0 = x_g - 2r_F$. При $t > 0$ положение центра пятна определяется координатами $\{x_0 - vt, 0, z_g(x_0 - vt, 0, t)\}$. Значение $z_g(x, 0, t)$ может меняться по мере заполнения пор пластины расплавленным металлом и формирования верхней поверхности сварного шва. При условии, что r_F — радиус лазерного луча в фокальной плоскости $z = 0$, согласно [12, 13]

$$r_H = \left\{ r_F^2 + \left[\frac{\lambda_0 z_g(x_0 - vt, 0, t)}{\pi r_F} \right]^2 \right\}^{1/2},$$

где λ_0 — длина волны излучения лазера. Таким образом, граничное условие в области воздействия лазерного луча на поверхность пластин либо сварного шва

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} = q(x, y, z); \quad i = 1, 2;$$

$$(x - x_0 + vt)^2 + y^2 \leq r_H^2; \quad z = z_g(x, 0, t);$$

$$q(x, y, z) = q_0 \exp[-2(x^2 + y^2)/r_H^2(z, t)];$$

q_0 — максимальная плотность мощности лазера.

В начальный момент времени ($t = 0$) температура пластин $T = T_0$, и

$$z_g(x, y, 0) = h_m; \quad 0 \leq x \leq x_g; \quad -y_g \leq y \leq y_p^-;$$

$$z_g(x, y, 0) = h_p; \quad 0 \leq x \leq x_g; \quad y_p^+ \leq y \leq y_g.$$

Под воздействием энергии лазерного излучения материал свариваемых пластин разогревается и плавится. При разогреве расплава выше температуры кипения он испаряется и образуется парогазовый канал. Предполагается, что форма и размеры канала определяются изотермой температуры кипения T_b [12, 13]. Согласно данным [14] мощность излучения лазера в парогазовом канале на глубине около 3 мм снижается в 8—10 раз. При этом лазерный пучок при сквозном проплавлении и величине проходящей мощности более 10% сохраняет все свои характерные особенности по распределению плотности [15]. Поэтому при расчетах для поверхности парового канала в области действия лазерного излучения использовалось соотношение

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{r_b} = q(x, y, z) \mathbf{n},$$

$$\text{где } q(x, y, z) = q_0 \left[1 - 0,9 \frac{z_g(x, 0, t) - z}{h_m} \right] \times \\ \times \exp\{-2(x^2 + y^2)/r_z^2\}; \quad (x - x_0 + vt)^2 + y^2 = r_b^2;$$

$r_b(z)$ — радиус парогазового канала в плоскости (y, z) на глубине z , определяемый расстоянием от центра лазерного луча до ближайшей точки со значением T_b температурного поля; r_z — радиус лазерного луча на глубине z определяется по формуле

$$r_z = \left\{ r_F^2 + \left[\frac{\lambda_0 z}{\pi r_F} \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad 0 \leq z \leq z_g(x, 0, t).$$

Так как кривизна поверхности в поперечном сечении сварного шва в плоскости (y, z) преобладает при сравнении с кривизной в продольном направлении x , рассматривается плоский случай. Для описания формы

верхней поверхности сварного шва в плоскости (y,z) используется метод, основанный на балансе давлений на поверхности жидкого металла от действия силы тяжести и поверхностного натяжения [16].

В начальный момент времени $t=0$ поперечное сечение системы монолитная пластина—пористая пластина в плоскости (y,z) характеризуется размерами $-y_p \leq y \leq y_g$, $0 \leq z \leq h_m$ и $y_p \leq y \leq y_g$, $0 \leq z \leq h_p$ (см. схему на фиг. 1). Рассмотрим поперечное сечение системы в некоторый момент t в плоскости (y,z) при $x=x_t$ после нагрева энергией лазерного излучения. Если в пористой пластине положение части границы плавления $y_s(z)$ удовлетворяет условию $y_s(z) > y_p$ при $0 \leq z \leq h_p$, а площадь расплавленного материала составляет S_p , то для заполнения пространства, занимаемого порами, необходимо количество расплавленного металла, равное $m_p S_p$. При этом появляются дополнительные параметры: положение границы фазового перехода y_{sp} на поверхности пористой пластины ($z=h_p$), положение границы фазового перехода y_{sm} на поверхности монолитной пластины ($z=h_m$). В зависимости от объема расплава, образовавшегося при плавлении монолитной пластины, следуют сценарии формирования верхней поверхности сварного шва.

По варианту 1 задачи определения формы верхней поверхности сварного шва при условии количество расплава в плоскости (y,z) в

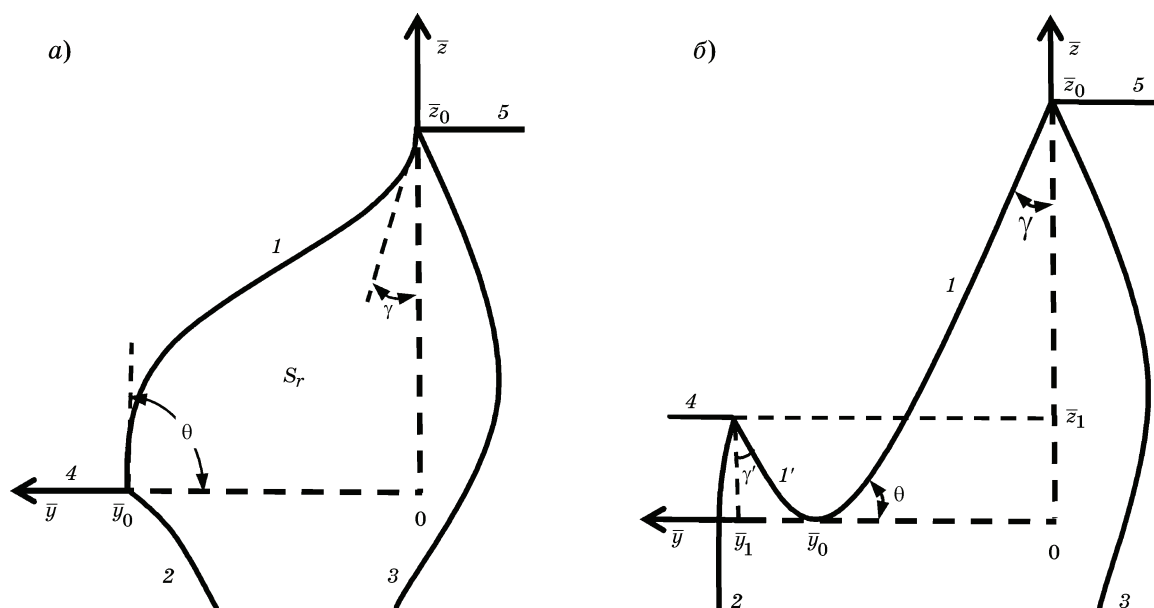
области $y_{sm} \leq y \leq y_{sp}$, $h_p \leq z \leq h_m$ оценивается как $S_r(t) = (y_p - y_{sm})(h_m - h_p) - m_p S_p > 0$. После замены переменных $\bar{z} = z - h_p$, $\bar{y} = y - y_{sm}$, $\bar{z}_0 = h_m - h_p$, $\bar{y}_0 = y_{sp} - y_{sm}$ определяется форма свободной поверхности сварного шва на текущее время t в плоскости $(\bar{y}, \bar{z})$ при $x=x_t$ (схема на фиг. 2, а). Согласно данным [16] форма свободной поверхности расплава описывается соотношениями

$$\bar{y} = \bar{y}_0 - \int_0^{\bar{z}_0} \frac{\varphi(\bar{z})}{\sqrt{1 - \varphi^2(\bar{z})}} d\bar{z},$$

$$\varphi(\bar{z}) = -\frac{\bar{z}^2}{2a^2} + \left(\frac{\bar{z}_0}{2a^2} + \frac{\sin \gamma - \cos \theta}{\bar{z}_0} \right) \bar{z} + \cos \theta =$$

$$= -\frac{1}{\sqrt{1 + (\partial \bar{z} / \partial \bar{y})^2}},$$

где $a^2 = \sigma / (g \rho_1)$; σ — коэффициент поверхностного натяжения расплава; g — ускорение свободного падения. Неизвестные параметры γ и θ — углы наклона поверхности расплава в верхней точке $(0, \bar{z}_0)$ и в точке $(\bar{y}_0, 0)$ у его основания определяются итерационным методом до выполнения следующих условий: 1) рассчитанная кривая 1 на фиг. 2, а начинается в точке $(\bar{y}_0, 0)$ и завершается в точке $(0, \bar{z}_0)$; 2) площадь треугольной поверхности с вершинами в точках $(\bar{y}_0, 0)$, $(0, \bar{z}_0)$, $(0, 0)$ равна величине $S_r(t)$, описанной выше.



Фиг. 2. Два варианта (а, б) схем ванны расплава при сварке пластин в плоскости $(\bar{y}, \bar{z})$: 1 — свободная поверхность расплава; 2, 3 — границы фазового перехода в пористой (2) и монолитной (3) пластинах; 4, 5 — верхние поверхности пластин

В зависимости от значений γ и θ кривая 1 может быть выпуклой, вогнутой или иметь форму прямого отрезка. После затвердевания расплава сечение шовного соединения в плоскости (x, y) не изменяется.

В случае $(y_p - y_{sm})(h_m - h_p) - m_p S_p \leq 0$ реализуется вариант 2 задачи по определению формы верхней поверхности сварного шва (схема на фиг. 2, б). Осуществляем следующую замену переменных: $\bar{z} = z - h_z$, $\bar{y} = y - y_{sm}$, $\bar{y}_1 = y_{sp} - y_{sm}$, $\bar{y}_0 = y_{sp} - y_z$, $\bar{z}_0 = h_m - h_z$, $\bar{z}_1 = h_p - h_z$. В этом варианте (y_z, h_z) — координата нижней точки в плоскости (y, z) , которую необходимо определить ($h_z < h_p$). В плоскости $(\bar{y}, \bar{z})$ на фиг. 2, б она соответствует точке $(\bar{y}_0, 0)$.

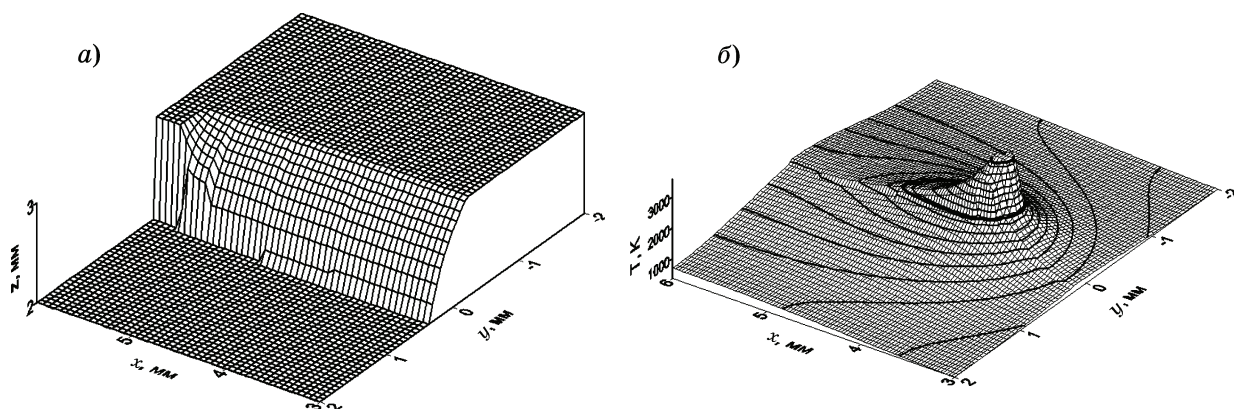
Применяется метод итераций для определения всех неизвестных параметров (γ , θ , γ' , y_z , h_z) с использованием соотношений, приведенных выше. Критерием решения задачи является выполнение условий (см. схему на фиг. 2, б): 1) рассчитанная кривая 1 начинается в точке $(\bar{y}_0, 0)$ и завершается в точке $(0, \bar{z}_0)$; 2) рассчитанная кривая 1' начинается в точке $(\bar{y}_0, 0)$ и завершается в точке $(\bar{y}_1, \bar{z}_1)$; 3) в точке $(\bar{y}_0, 0)$ углы наклона кривых 1 и 1' одинаковые и равны θ ; 4) сумма площадей треугольных поверхностей S_Σ с вершинами в точках $(\bar{y}_0, 0)$, $(0, \bar{z}_0)$, $(0, 0)$ и $(\bar{y}_0, 0)$, $(\bar{y}_1, 0)$, $(\bar{y}_1, \bar{z}_1)$ удовлетворяет соотношению $S_\Sigma + m_p S_p = (y_p - y_{sm})(h_m - h_z)$. По факту решаются две сопряженные задачи, аналогичные рассмотренному выше варианту 1, представленному на фиг. 2, а.

Результаты численных экспериментов.

В ходе численной реализации математической модели рассмотрены процессы сварки пластин из пористого и монокристаллического титана. Материал более толстых монокристаллических пластин использовался для сохранения уров-

ня расплава в сварном шве. Для расчетов при определении начальных и граничных условий использовались условия экспериментов. Численные исследования проводились при следующих параметрах [10, 17–19]: $x_g = 6 \cdot 10^{-3}$ м; $y_g = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $y_p = (0,02 - 0,3) \cdot 10^{-3}$ м; $h_p = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $h_m = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $v = 1,66 \cdot 10^{-2}$ м/с; $m_p = 0,33$; $T_c = 300$ К; $T_0 = 300$ К; $\rho_1 = 4120$ кг/м³; $\rho_2 = 4505$ кг/м³; $c_{p1} = 989$ Дж/(кг·К); $c_{p2} = 540$ Дж/(кг·К); $\lambda_1 = 38$ Вт/(м·К); $\lambda_2 = 19$ Вт/(м·К); $\kappa = 3,59 \cdot 10^5$ Дж/кг; $T_s = 1941$ К; $T_b = 3560$ К; $\sigma = 1,5$ Н/м; $\alpha_c = 50$ Вт/(м²·К); $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Дж/(с·м²·К⁴); $\varepsilon = 0,3$; $g = 9,81$ м/с²; $\lambda_0 = 10,6 \cdot 10^{-6}$ м; $r_F = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м; $q_0 = 4 \cdot 10^{14}$ Вт/м².

Фиг. 3, а иллюстрирует верхнюю поверхность формирующегося сварного шва. Центр лазерного пятна перемещается слева направо со скоростью 1,0 м/мин на расстоянии 0,2 мм от свариваемых поверхностей пластин. Вся энергия лазерного излучения воздействует на верхнюю поверхность монокристаллической пластины. Область, соответствующая $x \approx 5,5$ мм, отражает начальный период разогрева и частичное плавление обеих пластин. Дальнейший разогрев металла при перемещении лазерного луча способствует плавлению пластин по всей толщине, заполнению пространства пор расплавом и формированию сварного шва с выпуклой поверхностью. Из расчетов следует, что при $x \approx 4$ мм устанавливается квазистационарный режим процесса сварки. На фиг. 3, б отображено рассчитанное распределение температурного поля на верхних поверхностях пластин и сварного шва при квазистационарном режиме процесса сварки. Шаг между изотермами 200 К. Добавлены две изотермы (более толстые кривые), отображающие температуры плавления и испарения. Видно заметное из-



Фиг. 3. Поверхность сварного соединения (а) и распределение температурного поля (б) на верхних поверхностях пластин и сварного шва при положении центра лазерного луча на расстоянии 0,2 мм от свариваемой кромки

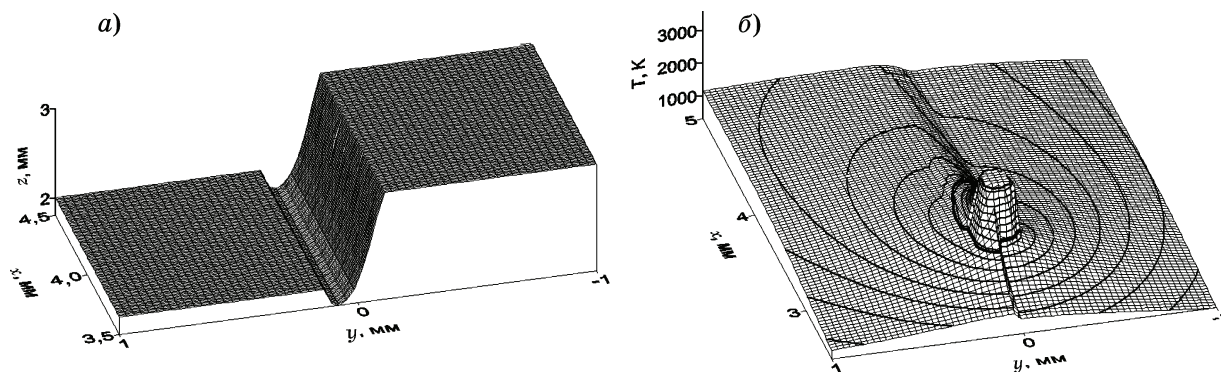
менение температурного градиента на границе сопряжения пористого и непористого металлов, сохраняющееся и после затвердевания расплава.

Сформировавшаяся верхняя поверхность сварного соединения в квазистационарном режиме процесса сварки для случая, когда центр лазерного пятна перемещается со скоростью 1 м/мин на расстоянии 0,02 мм от свариваемых поверхностей пластин, показана на фиг. 4, а. Особенностью рассмотренного варианта является то, что значительная часть энергии лазерного излучения воздействует на верхнюю поверхность пористой пластины. Это способствует ее интенсивному разогреву и значительному плавлению. Объема расплавленного металла, образовавшегося при нагреве монолитной пластины, недостаточно для заполнения объема пор и, как следствие, верхняя поверхность сварного шва имеет вогнутую форму.

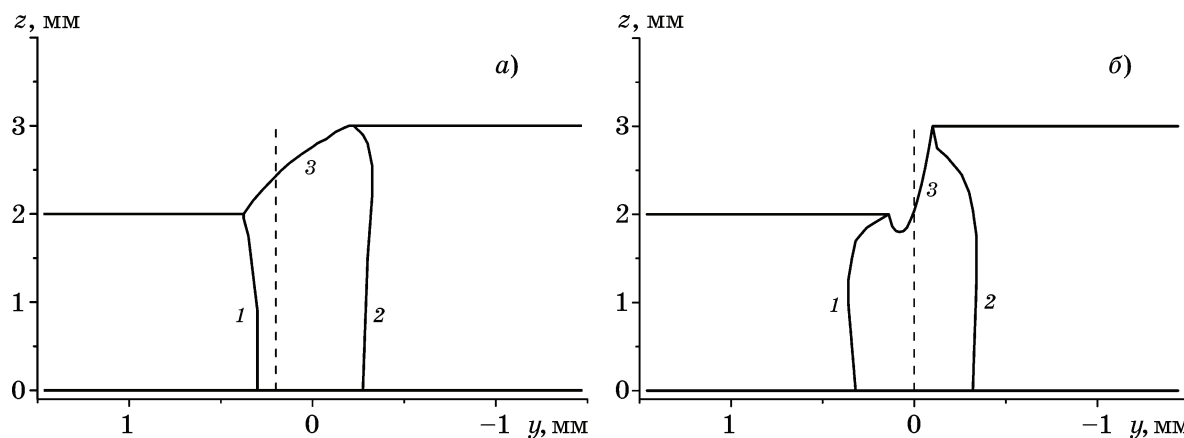
Фиг. 4, б иллюстрирует рассчитанное распределение температурного поля на верхних поверхностях пластин и сварного шва при

квазистационарном режиме процесса сварки. Шаг между изотермами 200 К. Добавлены две изотермы (более толстые кривые), отображающие температуры плавления и испарения. Изображение демонстрирует более значительный разогрев материала пористой пластины ($0 \text{ мм} \leq y \leq 1 \text{ мм}$) по сравнению с материалом монолитной пластины ($-1 \text{ мм} \leq y \leq 0 \text{ мм}$). Можно отметить заметное изменение температурного градиента на границе сопряжения пористого и непористого материалов, до и после их плавления.

Положения границ плавления в плоскости (y, z) пластин и верхние поверхности шовных соединений при квазистационарном режиме процесса сварки показаны на фиг. 5. Из представленных результатов следует, что при перемещении центра лазерного луча на расстоянии 0,2 мм от свариваемой кромки монолитной пластины образующегося объема расплавленного металла хватает как на заполнение объема пор, так и на образование сварного соединения с выпуклой верхней поверхностью (фиг. 5, а).



Фиг. 4. Поверхность сварного соединения (а) и распределение температурного поля (б) на верхних поверхностях пластин и сварного шва при положении центра лазерного луча на расстоянии 0,02 мм от свариваемой кромки



Фиг. 5. Границы плавления пористой (1) и монолитной (2) пластин, верхние поверхности сварного шва (3) при положении центра лазерного луча на расстоянии 0,2 (а) и 0,02 мм (б) от свариваемой кромки. Штриховая линия — положение поверхности соприкосновения пластин

В случае положения центра лазерного луча на расстоянии 0,02 мм от кромки монолитной пластины объема расплавленного металла недостаточно для заполнения свободного пространства, образовавшегося при плавлении пористой пластины. Вследствие этого формируется вогнутая верхняя поверхность области сварного соединения (фиг. 5, б). Это, в свою очередь, способствует увеличению ширины сварного шва у основания пластин, так как энергия лазерного излучения воздействует на металл, имеющий меньшую толщину, и мощность излучения в парогазовом канале также снижается меньше.

Таким образом, результаты численного моделирования показали следующее. Для получения качественного соединения при лазерной сварке необходимо плавление металла на соединяемых торцевых поверхностях пластин. Это достигается при возникновении сквозного парогазового канала, близкого к равномерному разогреву и плавлению свариваемой поверхности пористой пластины по всей толщине. При этом ширина и форма поверхности сварного шва, очевидно, зависят от пористости материала пластин, их толщины, расположения и скорости перемещения луча лазера, мощности подаваемой энергии.

Условием для плавления пористой пластины в области торцевой поверхности является перемещение луча лазера над пластиной монолитного металла на оптимальном расстоянии от свариваемой боковой кромки. Так, при движении лазерного луча со скоростью 1 м/мин на расстоянии $y_p \geq 0,3$ мм от свариваемых поверхностей плавления пористой пластины не было по всей толщине. В случае перемещения лазерного луча на расстоянии $y_p = 0,02$ мм от свариваемых поверхностей объема расплавленного металла монолитной пластины оказывалось недостаточно для заполнения пространства, образовавшегося при плавлении пористой пластины по всей толщине. Как результат, это влияло на геометрические характеристики сварного шва.

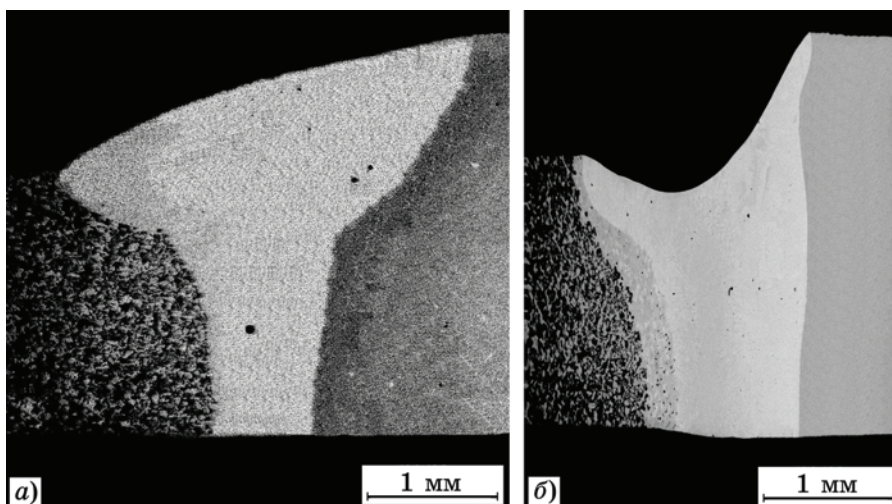
В случае соединения пластин одной толщины выявлена необходимость использования монолитной металлической вставки, размещаемой между торцами соединяемых пластин [10]. При этом высота прокладки должна быть больше толщины пластин, чтобы металла при ее плавлении хватило для за-

полнения объема пор и получения качественного сварного соединения.

Достоверность результатов, полученных при расчетах, подтверждена экспериментальными исследованиями, в ходе которых проводилась сварка монолитных пластин толщиной 3 мм с пластинами толщиной 2 мм и пористостью 33% из титана ВТ 1-0. Размеры монолитных пластин 50×20×3 мм; пористые пластины, изготовленные методом спекания порошкового материала, имели размер 50×20×2 мм. Свариваемые поверхности пластин предварительно были обработаны [10]. Лазерное излучение фокусировалось на образцах с помощью ZnSe-линзы, имеющей длину волны 10,6 мкм и фокусное расстояние 254 мм. Луч направлялся под прямым углом к верхней поверхности монолитной пластины вблизи свариваемой кромки, фокусное пятно располагалось на уровне нижней поверхности пластины. Сварку образцов проводили при мощности излучения 1,95 кВт и скорости перемещения луча 1,0 м/мин. Для защиты сварного шва использовался инертный газ (гелий).

На фиг. 6 представлены фотографии сварных соединений пористой и монолитной пластин из титана, полученных после обработки экспериментальных образцов. Фиг. 6, а иллюстрирует сечение сварного шва при расположении центра лазерного луча на расстоянии 0,2 мм от свариваемых поверхностей. Видно сквозное соединение пластин. Верхняя поверхность шва имеет выпуклую форму, так как не весь объем металла, образовавшийся при плавлении монолитной пластины, используется для заполнения пространства пор при плавлении пористой пластины. При этом ширина шовного соединения в верхней части более чем в 2 раза больше ширины у основания (~0,8 мм). Это следствие конвективного теплопереноса под влиянием термокапиллярного течения при воздействии энергии лазерного излучения на поверхность расплавленного металла.

На фиг. 6, б отображено поперечное сечение сварного шва, полученного при расположении центра лазерного луча на расстоянии 0,02 мм от свариваемых поверхностей. Видно, что имеет место сквозное соединение пластин, а также то, что расплавленный металл проник до 150 мкм в поры пластины. Ширина шовного соединения в нижней части около 1 мм. При этом верхняя поверхность



Фиг. 6. Вид сварных соединений пористой и монокристаллической титановых пластин в поперечном сечении при расположении центра лазерного луча на расстоянии 0,2 (а) и 0,02 мм (б) от свариваемых поверхностей

шва имеет вогнутую форму. Это объясняется тем, что пористая пластина расплавилась значительно и, как следствие, на заполнение пространства пор и формирование выпуклой поверхности не хватило объема расплава, образовавшегося при плавлении материала монокристаллической пластины. Сравнение изображений экспериментальных образцов на фиг. 6 с результатами расчетов, представленными на фиг. 3—5, свидетельствует о качественном и удовлетворительном количественном их согласовании.

Выводы. 1. Предложена нестационарная математическая модель сварки пластин из пористого и монокристаллического металла. В результате численного моделирования определено, что при лазерной сварке для осуществления равномерного нагрева металла на соединяемых торцевых поверхностях пластин и получения качественного соединения необходимо сквозное проплавление.

2. Показана возможность нахождения оптимальных параметров сварки, обеспечивающих получение качественного неразъемного соединения при согласовании толщин пористой и монокристаллической пластин, скорости перемещения и расположения луча лазера над поверхностью монокристаллической пластины, мощности подаваемой энергии.

3. Рассчитанные формы сварных швов в поперечном сечении и геометрия их верхних поверхностей удовлетворительно согласуются с полученными опытными данными. Отличия в морфологии границ швов в пластинах объясняются простотой модели, не учи-

тывающей конвективных движений в сварочной ванне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Banhart, J. Metal foams and porous metal structures / J. Banhart, V.F. Ashby, N.A. Fleck. — Bremen: MIT-Verlag, 1999. 416 p.
2. Banhart, J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams / J. Banhart // Progress in Mater. Sci. 2001. V.46. №6. P. 559—632.
3. Shapovalov, V. Prospective applications of gas-eutectic porous materials (gasars) in USA / V. Shapovalov // Mater. Sci. Forum. 2007. V. 539—543. P. 1183—1187.
4. Lefebvre, L.-P. Porous metals and metallic foams: current status and recent developments / L.-P. Lefebvre, J. Banhart, D.C. Dunand // Advanced Eng. Mat. 2008. V. 10. Iss. 9. P. 775—787.
5. Reisgen, U. Laser beam welding of open-porous metallic foams for application in cooling structures of combined cycle power plants / U. Reisgen, S. Olschok, S. Longerich // J. Eng. Gas Turbines Power. 2010. V. 132(5). Art. 054502 (1—5).
6. Costanza, G. An overview on laser welding of metal foams: Techniques, advantages and challenges / G. Costanza, F. Khoshnaw, M.E. Tata, K. Mehta // Procedia Structural Integrity. 2021. V. 33(C). P. 544—555.
7. Shih, J.-S. Multi-objective process optimization of pulsed plasma arc welding SS400 steel pipe with foamed aluminum liner / J.-S. Shih, Y.-F. Tzeng, Y.-F. Lin, J.-B. Yang // J. Advanc. Mech. Design, Syst. Manufact. 2012. V.6. Iss. 2. P. 222—235.
8. Smith, B.N. Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties / B.N. Smith, S. Szyniszewsky, J.F. Hajjar, B.W. Schafer, S.R. Arwade // J. Construct. Steel Research. 2012. V.71. P. 1—10.
9. Shirzadi, A.A. Joining stainless steel metal foams / A.A. Shirzadi, M. Kocak, E.R. Wallach // Sci. Techn. Weld. Join. 2004. V.9. Iss. 3. P. 277—279.

10. Черепанов, А.Н. Исследование лазерной сварки пористых металлов с применением компактных вставок и нанопорошков / А.Н. Черепанов, В.О. Дроздов, В.И. Мали, А.Г. Маликов, А.М. Оришич // ФММ. 2021. Т. 122. №3. С. 323—328.
11. Самарский, А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. — М. : Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
12. Sudnik, W. Numerical simulation of weld pool geometry in laser beam welding / W. Sudnik, D. Radaj, S. Breitschwerdt, W. Erofeew // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. P. 662—671.
13. Исаев, В.И. Численное моделирование лазерной сварки тонких металлических пластин с учетом конвекции в сварочной ванне / В.И. Исаев, В.П. Шاپеев, А.Н. Черепанов // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т.17. №3. С. 451—466.
14. Лопота, В.А. Модель лазерной сварки с глубоким проплавлением для применения в технологии / В.А. Лопота, Г.А. Туричин, Ю.Т. Сухов // Изв. РАН. Сер. физическая. 1997. Т. 61. №8. С. 123—130.
15. Игнатов, А. Лазерная сварка сталей мощными CO₂-лазерами. Ч.1 / А. Игнатов // Фотоника. 2008. №6. С. 10—17.
16. Matsunawa, A. Role of surface tension in fusion welding. Pt.1 / A. Matsunawa, T. Ohji // Transactions of JWRI. 1982. V. 11. №2. P. 145—154.
17. Зиновьев, В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В.Е. Зиновьев. — М. : Metallurgia, 1989. 384 с.
18. Zhou, K. Experimental study of surface tension, specific heat and thermal diffusivity of liquid and solid titanium / K. Zhou, H.P. Wang, J. Chang, B. Wei // Chem. Phys. Let. 2015. V. 639. P. 105—108.
19. Boivineau, M. Thermophysical properties of solid and liquid Ti-6Al-4V (TA6V) alloy / M. Boivineau, C. Cagran, D. Doytier, V. Eyraud, M.-H. Nadal, B. Wilthan, G. Pottlacher // Intern. J. Thermophys. 2006. V.27. P. 507—529.