УДК 519.6:621.791.725

Моделирование лазерной сварки пористой и монолитной металлических пластин^{*}

В.Н. Попов, А.Н. Черепанов

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

E-mail: popov@itam.nsc.ru

Проведено численное моделирование нестационарных процессов при лазерной сварке пластин из пористого и монолитного (непористого) металла. Исследовано влияние скорости сварки на качество получаемых соединений и морфологию шва. Рассчитанные характеристики соединений пористых и монолитных пластин из нержавеющей стали качественно согласуются с результатами проведенных физических экспериментов.

Ключевые слова: пористые металлы, лазерная сварка, численное моделирование.

Введение

В последние годы все большее применение находят пористые (вспененные) материалы, получаемые с помощью литья и порошковой металлургии. Увеличивается применение легких пористых металлов, имеющих высокую удельную прочность, в гражданском строительстве, авиастроении, судостроении и ряде других отраслей промышленности [1-5]. Однако одним из препятствий широкого применения металлических пористых материалов, является сложность получения прочного соединения при объединении различных деталей в единое целое. Разработка прогрессивных технологий соединения и обработки этих материалов является важным шагом для их распространенного использования в промышленности [6].

К настоящему времени разработан ряд способов соединения пористых металлов, таких как склеивание, пайка, диффузионная сварка, применение болтов и клепок. Но наиболее перспективным способом считается лазерная сварка. Так, в работе [7] рассматривались различные стратегии использования сварки лазерным лучом для сборки конструкций из пористых металлов с целью получения соединений с максимальной прочностью и оптимальной геометрией шва. В работе [8] был представлен обзор методов соединения пористых металлов с использованием лазерной сварки с присадочным материалом и без него. Авторы [9] экспериментально показали возможность получения прочных неразъемных соединений из пористых и монолитных металлов с помощью лазерного

^{*} Работа выполнена в рамках государственного задания (№ госрегистрации 121030500137-5).

[©] Попов В.Н., Черепанов А.Н., 2023

луча. Было определено, что при правильно выбранных параметрах и режимах сварки возможно получение сварных соединений с прочностью выше прочности свариваемого пористого металла. Вместе с тем отмечались затруднения при выборе рациональных режимов и технологических приемов для получения качественного соединения. Поэтому был сделан вывод о необходимости проведения как дополнительных экспериментальных исследований, так и численного моделирования для получения базовой информации и последующей оптимизации процесса сварки.

В настоящей работе приводятся результаты численных и экспериментальных исследований, которые иллюстрируют характерные особенности сварки пористых с непористыми металлических пластин. Сформулирована математическая модель, в которой рассматривается нестационарный теплоперенос в пластинах: разогрев и плавление металла, образование газового канала под влиянием энергии лазерного излучения, заполнение пространства пор расплавом, формирование морфологии верхней поверхности сварного шва, а также охлаждение и затвердевание расплава. Исследуется влияние скорости перемещения лазерного луча на тепловые режимы при сварке пористых пластин с монолитными, обеспечивающие получение неразъемных соединений. В качестве исходных параметров для расчетов используются условия и свойства свариваемых материалов, определенные при ранее проведенных экспериментальных исследованиях [9]. Приводятся результаты физических экспериментов, подтверждающие адекватность и достоверность предложенной модели.

Математическая модель

Рассматривается процесс лазерной сварки встык тонкой пластины пористого металла с более толстой пластиной монолитного металла. Процесс описывается в декартовой системе координат. Координатные оси x и y лежат в плоскости нижних поверхностей свариваемых пластин (рис. 1). Луч лазера, направленный параллельно оси zна верхнюю поверхность монолитной пластины на некотором расстоянии y_p от ее края, перемещается с постоянной скоростью v вдоль координаты x. Центр фокального пятна луча располагается на уровне нижней поверхности пластины на прямой с координатами (x, 0, 0). Под воздействием энергии лазерного излучения материал пластин вблизи их плотно соединенных торцевых поверхностей плавится. При разогреве расплава выше



температуры кипения происходит его испарение и возможно образование парогазового канала. Для упрощения задачи будем полагать, что значения теплофизических характеристик материала пластин в рассматриваемых интервалах температур в жидком и твердом состояниях являются постоянными либо корректируются в зависимости от величины пористости твердого металла. Влияние конвективного теплопереноса учитывается коэффициентом теплопроводности в жидком металле. Плавление металла происходит при температуре *T_s*, а фазовый переход описывается в приближении Стефана [10].

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

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

$$0 \le x \le x_{g}, -y_g \le y \le y_g, \ 0 \le z \le z_g(x, y, t)$$

здесь t — время, T — температура, $c_V = c_p \rho$, c_p — удельная теплоемкость, ρ — плотность, λ — коэффициент теплопроводности, $\lambda_3 = \lambda_2 (1-m_p)$, $\rho_3 = \rho_2 (1-m_p)$, $c_{V3} = c_{p3}\rho_3$, $c_{p3} = c_{p2} (1-m_p) + c_{pg}m_p$, c_{pg} — удельная теплоемкость нейтрального газа (аргона), m_p — пористость материала свариваемой пластины, индексы i = 1, 2, 3 соответствуют жидкому, твердому и пористому состояниям материала; x_g , y_g — координаты границ рассматриваемой области вдоль осей x и y соответственно (рис. 1), $z_g (x, y, t)$ — функция, описывающая верхнюю поверхность системы «непористая пластина – пористость $m_p = 0$.

Скорость перемещения каждой точки границы «расплав – твердая фаза» w_n при плавлении либо затвердевании сплошного металла определяется соотношением

$$\kappa w_{\mathbf{n}} = \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{T_{\mathbf{s}^+}} - \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{T_{\mathbf{s}^-}}$$

а при плавлении пористого материала используется формула

$$(1-m_{\rm p})\kappa w_{\rm n} = \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial {\bf n}}\Big|_{T_{\rm s}^+} - \lambda_3 \frac{\partial T}{\partial {\bf n}}\Big|_{T_{\rm s}^-}$$

где **n** — единичный вектор нормали, *к* — удельная теплота плавления металла.

Теплообмен на поверхности соприкосновения монолитной и пористой пластин ($y = y_p$, $0 \le x \le x_g$, $0 \le z \le h_p$) определяется условиями:

$$\lambda_i \left. \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right|_{y_{\mathrm{p}^-}} = \lambda_3 \left. \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right|_{y_{\mathrm{p}^+}}, \ T \Big|_{y_{\mathrm{p}^-}} = T \Big|_{y_{\mathrm{p}^+}}, \quad i = 1, \ 2 \left(\operatorname{прu} T \Big|_{y_{\mathrm{p}^+}} < T_{\mathrm{s}} \right),$$

а после плавления пористого материала $\left(\text{т.e. при } T \Big|_{y_{p}^{+}} \ge T_{s} \right)$:

$$\lambda_i \left. \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right|_{y_{\mathbf{p}^-}} = \lambda_i \left. \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right|_{y_{\mathbf{p}^+}}, \ T \Big|_{y_{\mathbf{p}^-}} = T \Big|_{y_{\mathbf{p}^+}}, \ i = 1, 2.$$

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

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \alpha \left(T_{\rm c} - T \right), \quad i = 1, 2, 3,$$

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

На верхнюю поверхность монолитной пластины толщиной h_m 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 $\{x_0, 0, z_g(x_0, 0, 0)\}$, где $z_g(x, y, 0) = h_m$, $0 \le x \le x_g$, $-y_g \le y \le y_p$, $x_0 = x_g - 2r_F$. 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 при плавлении монолитной и пористой пластин, заполнении пространства пор расплавленным металлом и формировании верхней поверхности сварного шва. При условии, что r_F — радиус лазерного луча в фокальной плоскости (z = 0), согласно [11, 12] получаем:

$$r_{H} = \left\{ r_{\rm F}^{2} + \left[\frac{\lambda_0 z_{\rm g} (x_0 - vt, 0, t)}{\pi r_{\rm F}} \right]^2 \right\}^{1/2},$$

здесь λ_0 — длина волны излучения лазера. Таким образом, граничное условие в области воздействия лазерного луча на поверхность монолитной пластины либо сварного шва запишется в виде:

$$\lambda_{i} \frac{\partial T}{\partial z} = q(x, y, z), \quad i = 1, 2, \ (x - x_{0} + vt)^{2} + y^{2} \le r_{H}^{2}, \quad z = z_{g}(x, 0, t),$$

 $z_{\rm g}(x, y, z) = q_0 \exp\left\{-2\left(x^2 + y^2\right)/r_H^2(r, t)\right\}, \quad q_0 = 2k_9 W/(\pi r_H^2), W$ — мощность лазера, k_0 — коэффициент поглощения.

В начальный момент времени (t = 0) температура пластин составляет:

$$T = T_0,$$

$$z_g(x, y, 0) = h_m, \ 0 \le x \le x_g, \ -y_g \le y \le y_{p^-},$$

$$z_g(x, y, 0) = h_p, \ 0 \le x \le x_g, \ y_{p^+} + \le y \le y_g.$$

Под воздействием энергии лазерного излучения материал свариваемых пластин плавится. При разогреве расплава выше температуры кипения происходит его испарение и образование парогазового канала. Предполагается, что форма и размеры канала определяются изотермой температуры кипения T_b [11, 12]. Согласно [13] мощность излучения лазера в парогазовом канале на глубине около 3 мм снижается в 8–9 раз. Вместе с тем лазерный пучок при сквозном проплавлении и величине проходящей мощности не менее 10 % первоначальной сохраняет все свои характерные особенности по распределению плотности [14]. Исходя из этого, при расчетах на поверхности парового канала в области действия лазерного излучения использовалось соотношение

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

где

 $q(x, y, z) = q_0 \left[1 - 0.9 \frac{r_g(x, 0, t) - z}{h_m} \right] \exp\left\{ -2\left(x^2 + y^2\right) / r_z^2 \right\}, \qquad \left(x - x_0 + vt\right)^2 + y^2 = r_b^2,$ $r_{\rm b}(z)$ — радиус парогазового канала на глубине z, определяемый по температуре кипе-

ния T_b, r_z — радиус лазерного луча на глубине z, определяемый по формуле

$$r_{z} = \left\{ r_{\rm F}^{2} + \left[\frac{\lambda_{0} z}{\pi r_{\rm F}} \right]^{2} \right\}^{1/2}, \ 0 \le z \le z_{\rm g}(x, 0, t).$$

В начальный момент времени t = 0 монолитная пластина характеризуется размерами $-y_g \le y \le y_p$, $0 \le z \le h_m$, пористая пластина — $y_p \le y \le y_g$, $0 \le z \le h_p$. Полагаем, что при плавлении металла монолитной и пористой пластин происходит заполнение расплавом пространства, занимаемого порами. Рассмотрим в некоторый момент времени t в плоскости (y, z) при $x = x_t$ поперечное сечение системы «монолитная пластина – пористая пластина» после нагрева энергией лазерного излучения. Если положение части границы плавления пористой пластины $y_s(z)$ удовлетворяет условию $y_s(z) > y_p$ при $0 \le z \le h_p$, а площадь расплавленного материала в плоскости (y, z) составляет S_p , то количество расплава, необходимое для заполнения пространства, занимаемого порами, оценивается как *m*_р *S*_р.

Для определения формы верхней поверхности шва используется метод, основанный на балансе давлений на поверхности жидкого металла в зависимости от действия силы тяжести и поверхностного натяжения [15]. Принимая во внимание, что кривизна поверхности в поперечном сечении сварного шва преобладает в сравнении с кривизной в продольном направлении, получим следующий алгоритм определения верхней границы расплава в поперечном сечении. Пусть в плоскости (y, z) на поверхности монолитной пластины ($z = h_{\rm m}$) положение границы фазового перехода определено как $y_{\rm sm}$, а на поверхности пористой пластины ($z = h_p$) положение границы фазового перехода — y_{sp} . При этом количество расплава в области $y_{sm} \le y \le y_{sp}, h_p \le z \le h_m$ оценивается как $S_r(t) =$ $= (y_p - y_{sm})(h_m - h_p) - m_p S_p$. Если осуществить замену переменных $\overline{z} = z - h_p$, $\overline{y} = y - y_{sm}$, $\overline{z}_0 = h_{\rm m} - h_{\rm p}$, $\overline{y}_0 = y_{\rm sp} - y_{\rm sm}$, то в соответствии со схемой, представленной на рис. 2, граница свободной поверхности расплава в плоскости $(\overline{z}, \overline{y})$ при $x = x_t$, согласно [15], описывается соотношением

$$\overline{y} = y_0 - \int_0^{z_0} \frac{\varphi(\overline{z})}{\sqrt{1 - \varphi^2(\overline{z})}} d\overline{z},$$
$$\varphi(\overline{z}) = -\frac{\overline{z}^2}{2a^2} + \left(\frac{\overline{z}_0}{2a^2} + \frac{\sin\gamma - \cos\theta}{\overline{z}_0}\right)\overline{z} + \cos\theta = -\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\overline{\partial \overline{z}}/\overline{\partial \overline{y}}\right)^2}}$$

Рис. 2. Двухмерная схема ванны расплава при сварке пластин в плоскости $(\overline{z}, \overline{y})$.

1-3 — свободная поверхность расплава, границы фазового перехода в пористой и монолитной пластинах соответственно.



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 и y его основания — определяются итерационным методом до выполнения условий: 1) рассчитанная кривая l на рис. 2 начинается в точке $(\bar{y}_0, 0)$ и завершается в точке $(0, \bar{z}_0)$; 2) рассчитанная площадь треугольной поверхности с вершинами в точках $(\bar{y}_0, 0)$, $(0, \bar{z}_0)$, (0, 0) равна величине $S_r(t)$, описанной выше. После затвердевания расплава форма свободной поверхности шва в плоскости (x, y) не изменяется.

Результаты численных экспериментов

Для проверки модели и алгоритма ее реализации рассмотрены процессы сварки пластин из пористого и монолитного металлов. Для сохранения уровня расплава в сварном шве используются более толстые монолитные пластины. При расчетах применялись условия, соответствующие проведенным экспериментам, и теплофизические характеристики свариваемых материалов. Численные исследования проводились при параметрах для нержавеющей стали [9, 16, 17], приведенных в таблице.

Табл	ица
Теплофизические параметры нержавеющей стали в твердом, жидком и пористом состояни	ях

λ ₁ ,	λ ₂ ,	λ ₃ ,	с _{р1} ,	с _{р2} ,	с _{р3} ,	ρ ₁ ,	<i>ρ</i> 2,	<i>ρ</i> 3,
Βτ/(м·K)	Βτ/(м·K)	Вт/(м·К)	Дж/(кг∙К)	Дж/(кг∙К)	Дж/(кг∙К)	кг/м ³	кг/м ³	кг/м ³
52	26	16,9	835	650	605	7300	7860	5 109

Остальные параметры были следующие: $x_g = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $y_g = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $y_p = (0, 2 - 0, 4) \cdot 10^{-3}$ м, $h_p = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $h_m = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $v = (1, 33 - 1, 66) \cdot 10^{-2}$ м/с, $m_p = 0, 35$, $T_c = 300$ K, $T_0 = 300$ K, $\kappa = 2, 77 \cdot 10^5$ Дж/кг, $T_s = 1713$ K, $T_b = 3273$ K, $\sigma = 1, 85$ H/м, $\alpha_c = 50$ BT/(м²·K), $\varepsilon = 0, 3$, $\sigma_0 = 5, 67 \cdot 10^{-8}$ Дж/(с·м²·K⁴), g = 9, 81 м/с², $l_0 = 10, 6 \cdot 10^{-6}$ м, $r_F = 0, 110^{-3}$ м, W = 1, 8 кВт, $k_0 = 0, 6$.



Рис. 3. Формирование верхней поверхности сварного соединения (*a*) и распределение температурного поля на верхней поверхности пластин (*b*) при скорости перемещения лазерного луча 1 м/мин и *y*_p = 0,37 мм.

Рисунок 3*а* иллюстрирует верхние поверхности пластин и сварного соединения от начала процесса сварки до его перехода в квазистационарный режим. Центр лазерного пятна расположен на расстоянии $y_p = 0,37$ мм от свариваемого торца и перемещается слева направо со скоростью 1,0 м/мин. Вся энергия лазерного излучения воздействует на верхнюю поверхность монолитной пластины. В сечениях, соответствующих $x \approx 5,5$ мм, происходит частичное плавление монолитной пластины в начальный период ее разогрева. При перемещении лазерного луча последующий разогрев металла и образование парогазового канала способствуют плавлению обеих пластин по всей толщине, заполнению пространства пор расплавом и формированию сварного шва с выпуклой поверхностью. Из полученных результатов следует, что при $x \le 3$ мм устанавливается квазистационарный режим процесса сварки. Параметры процесса обеспечивают получение плавных переходов от металла шва к металлу пластин, что позволяет избежать последующей механической обработки сварного соединения.

На рис. 3b отражено рассчитанное распределение температурного поля на верхних поверхностях пластин и сварного шва при квазистационарном режиме процесса сварки. Шаг между изотермами составляет 300 К. Более толстая кривая соответствует изотерме плавления. Размер поверхности расплавленного металла вдоль оси x составляет 1,2 мм, в поперечном сечении вдоль оси y — около 0,57 мм. На верхней поверхности шовного соединения центр парогазового канала диаметром 0,15 мм находится в точке с координатами x = 1 мм, y = 0 мм. На рисунке видно заметное изменение температурного градиента на границе сопряжения пористого и непористого металлов, сохраняющееся и после затвердевания расплава.

На рис. 4*a* представлена верхняя поверхность свариваемых пластин и сварного шва при перемещении луча лазера со скоростью 1,0 м/мин при сохранении прочих параметров. Лазерное пятно здесь расположено на поверхности монолитной пластины на расстоянии $y_p = 0,34$ мм. Рисунок иллюстрирует сформировавшуюся поверхность с момента начала процесса сварки до его перехода к квазистационарному режиму. В сечениях вблизи $x \approx 5,5$ мм отображено частичное плавление монолитной пластины в начальный период ее разогрева. Перемещение лазерного луча при образовавшемся сквозном парогазовом канале способствует дальнейшему разогреву металла, плавлению обеих пластин



Рис. 4. Формирование верхней поверхности сварного соединения (*a*) и распределение температурного поля на верхней поверхности пластин (*b*) при скорости перемещения лазерного луча 1 м/мин и *y*_p = 0,34 мм.

по всей толщине, заполнению пространства пор расплавом и формированию сварного шва с вогнутой поверхностью в сечениях 4,2 мм $\leq x < 5,5$ мм. Из полученных результатов следует, что при $x \leq 3$ мм устанавливается квазистационарный режим процесса сварки. При этом параметры процесса обеспечивают получение плавных переходов от металла шва к металлу пластин.

Рис. 4b иллюстрирует рассчитанное распределение температурного поля на верхних поверхностях пластин и сварного шва при квазистационарном режиме процесса сварки. Более толстая кривая соответствует изотерме плавления. Размер поверхности расплавленного металла вдоль оси x составляет 1,1 мм, а в поперечном сечении вдоль оси y достигает 0,66 мм. На верхней поверхности шовного соединения центр сквозного парогазового канала диаметром 0,15 мм находится в точке с координатами x = 1,1 мм, y = 0 мм.

На рис. 5 в плоскости (y, z) при x = 2 мм отображены расчетные расположения границ плавления пластин и верхние поверхности шовных соединений. Кривые 1 и 2 определены по изотермам температуры T_s во время максимального проплавления металлов пористой и монолитной пластин. Из представленных результатов следует, что при смещении лазерного луча от границы стыка пластин на 0,37 мм формируется выпуклая (валиковая) форма верхней поверхности сварного шва (рис. 5a), ширина области плавления пористой пластины изменяется от 0,135 мм у основания до 0,2 мм на уровне верхней поверхности. Ширина проплавления монолитной пластины в среднем составляет 0,5 мм. При перемещении лазерного луча с той же скоростью, но с его смещением на 0,34 мм, получена вогнутая (без провисания) монотонная поверхность области сварного соединения (рис. 5b). Морфология верхней поверхности шва зависит от величины смещения пятна лазерного луча на поверхности монолитной пластины. При воздействии лазерного луча на указанную поверхность происходит плавление компактного и пористого материалов пластин, положения которых в ходе экспериментов фиксировалось. В случае малого смещения ($\leq 0,34$ мм) формируется вогнутая без провисания (либо вогнутая с провисанием) поверхность шва, форма которой определяется недостатком вещества расплава на компенсацию проплавленного объема пористой пластины. При избыточном проплавлении монотонной пластины (смещение 0,37 мм) сформировалась выпуклая (валикообразная) морфология шва.



Рис. 5. Расчетные границы сварного шва в пористой (1) и монолитной (2) пластинах, а также верхняя поверхность шва (3) при скорости сварки 1 м/мин и y_p = 0,37 мм (a), 0,34 (b) мм. Штриховая линия — положение поверхности соприкосновения пластин.



Рис. 6. Экспериментальные микрофотографии сварных соединений, представленных в работе [9], при мощности излучения W = 1,8 кВт, скорости сварки 1 м/с; у_р=0,37 (*a*), 0,34 мм (*b*).

На рис. 6 представлены поперечные сечения сварных соединений, полученных экспериментально при эквивалентных расчетным режимах и условиях сварки, указывающих на качественное согласование результатов вычисления и опытных данных. Технические и технологические условия проведенных экспериментов изложены в работе [9].

Заключение

Предложена нестационарная математическая модель сварки пластин из пористого и монолитного металлов, на основе которой исследовано влияние параметров сварки на морфологию сварного шва. Показано, что для получения качественного соединения необходимо сквозное («кинжальное») проплавление соединяемых металлов в зоне стыка. Это достигается при возникновении парогазового канала, при разогреве, близком к равномерному, и плавлении свариваемых пластин по всей их толщине. При этом, чтобы обеспечить формирование сварного шва без значительных наплывов и провисаний его верхней поверхности, пятно лазерного луча необходимо располагать на поверхности монолитной пластины на определенном расстоянии от свариваемых торцов, зависящем от пористости, режимов сварки и физических параметров металла. Рассчитанные формы сварных швов в поперечном сечении и морфология их верхних поверхностей качественно согласуются с опубликованными опытными данными, что указывает на адекватность моделирования процессов формирования сварного шва. Некоторое отличие в морфологии границ шва в монолитных пластинах связано с упрощением модели, не учитывающей термокапиллярную конвекцию расплава в сварочной ванне. Как показало сравнение результатов численного моделирования с полученными ранее экспериментальными данными авторов, соблюдение указанных выше режимов сварки необходимо для получения прочности сварных соединений на растяжение выше или равной прочности соединяемого пористого металла.

Список литературы

- 1. Banhart J., Ashby M.F., Fleck N.A. Metal foams and porous metal structures. Bremen: MIT-Verlag, 1999. 416 p.
- Banhart J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams // Progress in Materials Sci. 2001. Vol. 46, No 6. P. 559–632.
- Shapovalov V. Prospective applications of gas-eutectic porous materials (gasars) in USA // Materials Sci. Forum. 2007. Vol. 539–543. P. 1183–1187.

- 4. Shih J.-S., Tzeng Y.-F., Lin Y.-F., Yang J.-B. Multi-objective process optimization of pulsed plasma arc welding SS400 steel pipe with foamed aluminum liner // J. of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. 2012. Vol. 6, Iss. 2. P. 222–235.
- Smith B.N., Szyniszewsky S., Hajjar J.F., Schafer B.W., Arwade S.R. Steel foam for structures: a review of applications, manufacturing and material properties. // J. of Constructional Steel Research. 2012. Vol. 71. P. 1–10.
- Shirzadi A.A., Kocak M., Wallach E.R. Joining stainless steel metal foams // Sci. and Technology of Welding and Joining. 2004. Vol. 9, Iss. 3. P. 277–279.
- Reisgen U., Olschok S., Longerich S. Laser beam welding of open-porous metallic foams for application in cooling structures of combined cycle power plants // J. Engng Gas Turbines Power. 2010. Vol. 132, Iss. 5. P. 054502-1– 054502-5.
- Costanza G., Khoshnaw F., Tata M.E., Mehta K. An overview on laser welding of metal foams: techniques, advantages and challenges // Procedia Structural Integrity. 2021. Vol. 33(C). P. 544–555.
- 9. Черепанов А.Н., Дроздов В.О., Маликов А.Г. Сварка пористых пластин с компактными пластинами большей толщины с использованием наномодифицирующих добавок // Инж.-физ. журнал. 2022. Т. 95, № 7. С. 1836–1840.
- 10. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача, М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
- 11. Sudnik W., Radaj D., Breitschwerdt S., Erofeew W. Numerical simulation of weld pool geometry in laser beam welding // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. Vol. 33. P. 662–671.
- 12. Черепанов А.Н., Шапеев В.П., Фомин В.М., Семин Л.Г. Численное моделирование теплофизических процессов при лазерно-лучевой сварке с образованием парового канала // Прикл. механика и техн. физика. 2006. Т. 47, № 5. С. 88–96.
- **13. Лопота В.А., Туричин Г.А., Сухов Ю.Т.** Модель лазерной сварки с глубоким проплавлением для применения в технологии. // Изв. АН. Сер. физика. 1997. Т. 61, № 8. С. 123–130.
- 14. Игнатов А. Лазерная сварка сталей мощными СО₂-лазерами. Ч. 1 // Фотоника. 2008. № 6. С. 10-17.
- Matsunawa A., Ohji T. Role of surface tension in fusion welding. P. 1 // Transactions of JWRI. 1982. Vol. 11, No. 2. P. 145–154.
- 16. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989. 384 с.
- 17. Шлямнев А.П., Свистунова Т.В., Лапшина О.Б., Сорокина Н.А., Маторин В.И., Столяров В.И., Боголюбский С.Д., Козлова Н.Н., Еднерал А.Ф. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: Справочник. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 232 с.

Статья поступила в редакцию 11 мая 2022 г., после доработки — 2 июля 2023 г., принята к публикации 17 августа 2023 г.