



# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ПЕНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Академик **В. И. МАХНЕНКО**, **Е. А. ВЕЛИКОИВАНЕНКО**, канд. физ.-мат. наук,  
**Г. Ф. РОЗЫНКА**, **Н. И. ПИВТОРАК**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**П. ЗАЙФФАРТ**, **У. ЯСНАУ** (Учеб.-ислед. ин-т, г. Росток, Германия)

Предлагается алгоритм численного определения температурных полей сварного соединения (зоны проплавления) при сварке встык элементов с пенистой макроструктурой. Основу такого алгоритма составляет соответствующее математическое моделирование пенистой макроструктуры с использованием статистических данных относительно размеров пор. Показано, что при высокой пористости режим сварки должен существенно отличаться от такового для сплошного материала.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, пенистая (пористая) макроструктура, стохастические характеристики макроструктуры, сварочные процессы, сверхлегкие конструкционные материалы, неразъемные соединения, жидкая ванна, сварка плавлением, пористость материала, температурные поля

В последние годы резко возрос интерес к применению в технике сверхлегких конструкционных материалов на основе пенистой (пористой) макроструктуры, что весьма убедительно следует из содержания сборника [1], работ [2, 3] и др. Интенсивные исследования свойств таких материалов проводятся как экспериментальными, так и расчетными [4] методами.

Соединение элементов конструкций из таких материалов является важной проблемой [5 и др.]. Большой интерес представляют неразъемные соединения, полученные традиционными способами сварки плавлением. Однако имеющийся опыт показал, что использование этих способов сварки для получения качественных сварных соединений связано со значительными трудностями. Применение специальных способов для образования пенистой структуры металла жидкой ванны достаточно сложно. В связи с этим особый интерес вызывают способы сварки плавлением, при которых достигается минимальное расплавление основного материала. В частности, при лучевых способах сварки с промежуточной сплошной расплавленной прослойкой (рис. 1) можно получить достаточно качественное сварное соединение. Однако выбор рациональных энергетических параметров режима сварки и толщины прослойки  $b$ , при которых достигается минимальное проплавление основного материала, требует подробных исследований. В этом случае могут помочь методы математического моделирования, основанные на описании процесса нагрева сварочным источником тепла конкретного соединения с учетом специфики макроструктуры материала. Последняя в значительной степени влияет на распространение тепла, поскольку пустоты (поры) по сравнению с металлической основой являются существенным барьером для этого.

Обычно макроструктуру пенистого (пористого) материала описывают с помощью статистического закона распределения размеров пор. В качестве иллюстрации сказанного на рис. 2 приведены макрошлифы сечений материала из пенистого алюминия [2], а на рис. 3 — статистические данные о плотности (частоте) распределения  $P(S)$  размера  $S$  отдельных ячеек (пор). Из рис. 2 видно, что форма отдельных пор достаточно сложная и их характерный размер  $S$  может изменяться случайно в широких пределах. Если известен статистический закон распределения размеров пор, т. е.  $P(S)$ , как на рис. 3, а среднюю плотность пористого материала обозначить  $\gamma$ , то, задав определенную форму элементарной ячейки, можно рассчитать среднюю толщину  $\delta$  стенки таких ячеек.

Например, если принять элементарные ячейки в виде куба со стороной  $S$ , то  $\delta$  можно определить из уравнения

$$\gamma = \gamma_0 \frac{\sum_i^N [S_i^3 - (S_i - \delta)^3] P(S_i)}{\sum_i^N S_i^3 P_i}, \quad (1)$$

где  $\gamma_0$  — плотность основного материала;  $N$  — количество ячеек в значительном объеме металла.

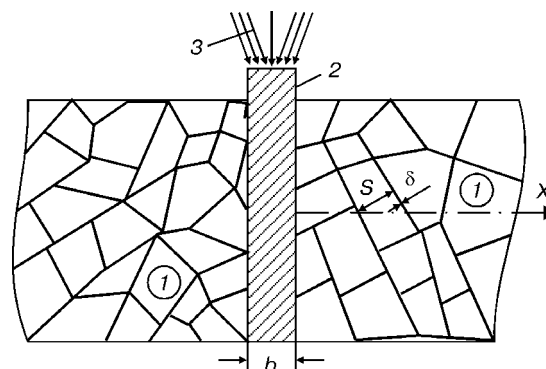


Рис. 1. Схема сварки встык плавлением пористого материала со сплошной расплавленной прослойкой: 1 — основной материал; 2 — прослойка; 3 — тепловой поток

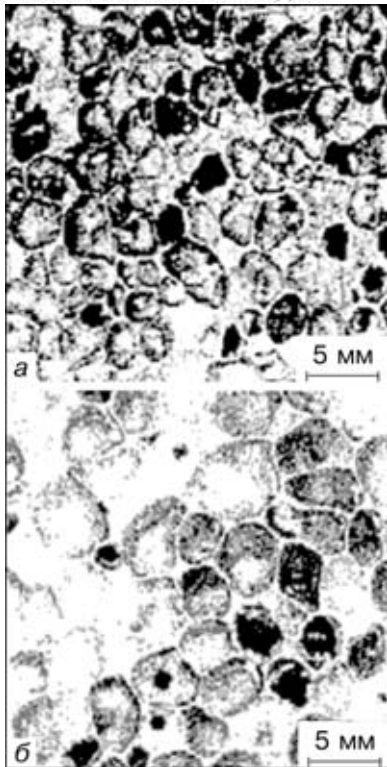


Рис. 2. Макрошлифы сечений двух материалов из пенистого алюминия с мелкими (а) и более крупными (б) порами [2]

После несложных преобразований (1) для определения  $\delta$  получим следующее кубическое уравнение:

$$\delta^3 - A\delta^2 + B\delta = F, \quad (2)$$

где

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N 3S_i P(S_i)}{\sum_{i=1}^N P(S_i)}; \quad B = \frac{\sum_{i=1}^N 3S_i^2 P(S_i)}{\sum_{i=1}^N P(S_i)}; \quad F = \frac{\gamma}{\gamma_0} \frac{\sum_{i=1}^N 3S_i^3 P(S_i)}{\sum_{i=1}^N P(S_i)}. \quad (3)$$

При достаточно большой выборке  $N$  сумма  $\sum_{i=1}^N P(S_i) = 1$  соответственно

$$A = 3\bar{S}_i; \quad B = 3 \langle S_i^2 \rangle; \quad F = \frac{\gamma}{\gamma_0} \langle S_i^3 \rangle, \quad (4)$$

где  $\bar{S}_i$  — математическое ожидание случайной величины  $S_i$ ;  $\langle S_i^2 \rangle$  и  $\langle S_i^3 \rangle$  — соответственно ма-

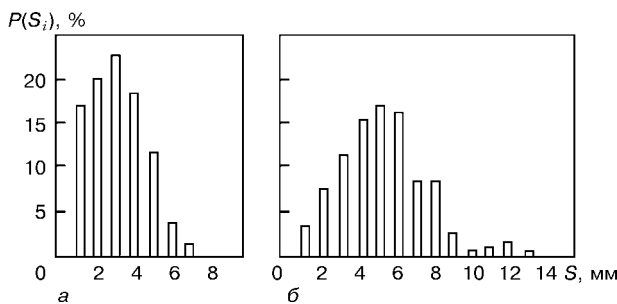


Рис. 3. Статистические данные об относительной плотности распределения размеров отдельных ячеек  $P(S_i)$  для материалов со структурой, показанной соответственно на рис. 2.

тематическое ожидание случайных величин  $S_i^2$  и  $S_i^3$ .

На рис. 4 приведены результаты расчета значений  $\delta$  для двух вариантов распределений размеров  $P(S_i)$  элементарных ячеек по рис. 3 в зависимости от коэффициента сплошности (соответственно коэффициент пористости составляет  $1 - \frac{\gamma}{\gamma_0}$ ). Из рис. 4 видно, что значения  $\delta$  монотонно возрастают от нуля (при  $\frac{\gamma}{\gamma_0} = 0$ ) до некоторого предельного значения  $\delta_{пр}(P) \approx \bar{S}_i$  (при  $\frac{\gamma}{\gamma_0} \rightarrow 1$ ). В частности, для варианта на рис. 3, а при  $\delta = 0,1$  мм,  $\gamma/\gamma_0 = 0,065$   $\bar{S}_i = 3,33$  мм. Для этого же варианта в случае  $\delta = 0,5$  мм,  $\gamma/\gamma_0 = 0,30$   $\bar{S}_i$  своего значения не меняет.

Рассмотренное моделирование макроструктуры пенистого материала можно считать наиболее простым и достаточно грубым приближением. Возможны и другие более сложные варианты схематизации геометрии элементарных ячеек и толщины перегородок [4], точнее отражающие наблюдаемую реальность. Однако при этом существенно возрастает количество характерных параметров макроструктуры, увеличивается трудоемкость численного описания и сложность воспроизведения процесса с учетом стохастичности ее строения.

Следует отметить, что воспроизведение процесса сварочного нагрева пенистой макроструктуры при заданных характеристиках ее стохастического описания требует специальных подходов. Используя схему мощного быстродвижущегося источника тепла [6], можно рассматривать независимо отдельные поперечные сечения свариваемого материала с соответствующей случайной морфологией пенистой макроструктуры. Численное решение задачи определения зоны проплавления для каждого такого сечения при конкретных условиях сварки является отдельным случайным результатом для данного материала. При достаточно большой выборке результатов можно получить статистические характеристики зоны проплавления определенного материала при конкретных условиях сварки. Из изложенного выше следует, что получение соответствующего набора случайных пенистых макроструктур для рассматриваемого

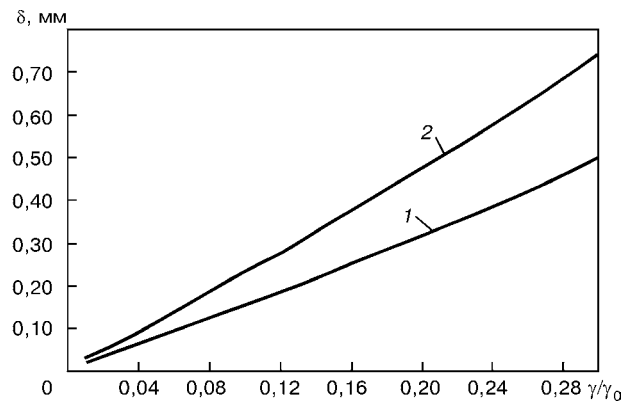


Рис. 4. Зависимость средней толщины стенок ячеек  $\delta$  от  $\gamma/\gamma_0$  для характеристики  $P(S_i)$ , полученной по рис. 3, а (1) и 3, б (2)

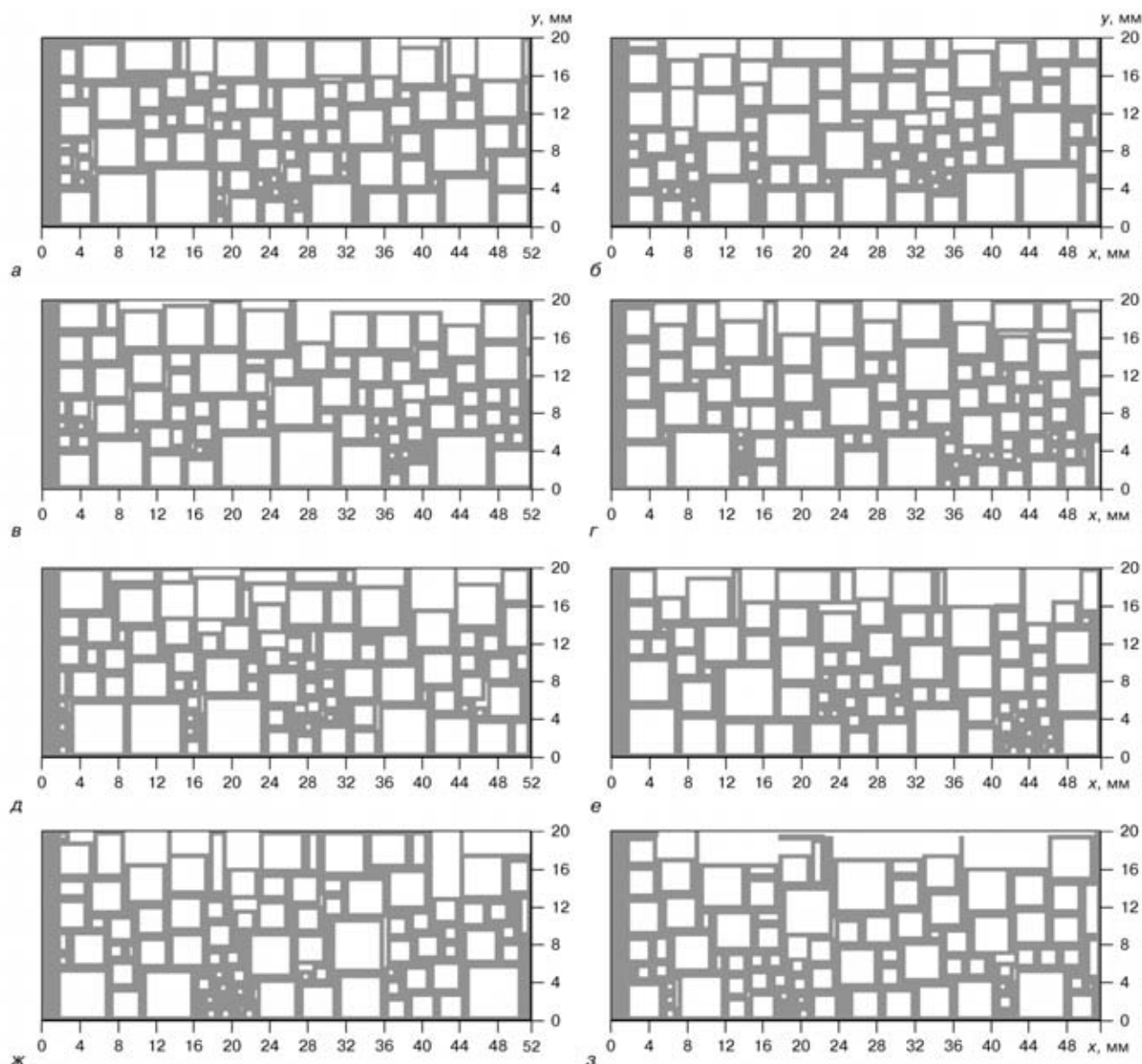


Рис. 5. Моделируемые макроструктуры (а-з) случайных сечений материала с характеристиками  $P(S_i)$  по рис. 3, а при  $\gamma\gamma_0 = 0,3$ ,  $\delta = 1$  мм и  $\bar{S} = 3,33$  мм

материала с заданными статистическими характеристиками, которые определяются плотностью распределения размеров  $P(S_i)$  ячеек при соответствующей идеализации их формы и среднем значении  $\delta$ , является исходным фактором для численного моделирования рассматриваемой задачи. С этой целью в работе использовался генератор ряда

случайных чисел, при помощи которого при заданном  $P(S_i)$  выбирались последовательно ячейки для заполнения рассматриваемой области (рис. 5).

Каждое случайное сечение определялось начальным числом указанного ряда. Это число фиксировалось для повторного воспроизведения, но выбиралось случайно. На рис. 5 видно, что

Таблица 1. Влияние температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) на теплофизические свойства алюминиевого сплава АМг6 [7] и сухого воздуха [8]

Объект исследований	20	100	200	300	400	500	600	700	800	1000
Теплопроводность $\lambda$ , Вт/см $^{\circ}\text{C}$										
Воздух	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$3,49 \cdot 10^{-6}$	$3,93 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$5,21 \cdot 10^{-6}$	$5,74 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$6,71 \cdot 10^{-6}$	$7,18 \cdot 10^{-6}$	$8,07 \cdot 10^{-6}$
АМг6	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	—	—	—
Объемная теплоемкость $c_v$ , Дж/см $^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$										
Воздух	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$0,95 \cdot 10^{-3}$	$0,76 \cdot 10^{-3}$	$0,64 \cdot 10^{-3}$	$0,56 \cdot 10^{-3}$	$0,50 \cdot 10^{-3}$	$0,45 \cdot 10^{-3}$	$0,41 \cdot 10^{-3}$	$0,38 \cdot 10^{-3}$	$0,33 \cdot 10^{-3}$
АМг6	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	2,95	3,0	—	—	—

Примечания: 1. Для сплава АМг6  $T_S \approx 560$   $^{\circ}\text{C}$  и  $T_L \approx 640$   $^{\circ}\text{C}$  (соответственно температура солидус и ликвидус); 2.  $g_{\text{ск}} = 1050$  Дж/см $^3$  — скрытая теплота плавления.



пенистые макроструктуры, имеющие одинаковые  $P(S_i)$ , отличаются заметно, что, естественно, должно отразиться и на результатах численного моделирования размеров и формы зоны проплавления при соответствующем сварочном нагреве.

С целью получения данных о зоне проплавления конкретной макроструктуры использовался обычный подход для решения тепловой задачи 2D в рамках схемы быстро движущегося источника для области с переменными свойствами (табл. 1). Размеры конечных элементов выбирались в зависимости от толщины  $\delta$  стенок пор.

Тепловая погонная энергия  $q_{II}$  источника сварочного нагрева распределялась по нормальному закону по ширине и глубине промежуточной сплошной прослойки из алюминиевого сплава; она представлена функцией

$$g(x,y) = g_0 e^{-K_x x^2 - K_y y^2}, \quad (5)$$

где  $g_0 = \frac{\pi q_{II}}{\sqrt{K_x K_y}}$ ;  $K_x$  и  $K_y$  — коэффициенты сосредоточенности теплового потока соответственно вдоль осей  $x$  и  $y$ .

Поскольку при лучевых способах сварки имеются возможности для регулирования распределенности теплового потока, то в работе принималось

$$K_x = \frac{4a_x}{b^2}; \quad K_y = \frac{4a_y}{H^2}, \quad (6)$$

Таблица 2. Рекомендуемая погонная энергия при сварке алюминиевых пластин с пенистой макроструктурой толщиной 20 мм с промежуточной сплошной прослойкой (см. рис. 1)\*

№ варианта	$\gamma\%$	$P(S_i)$	$\bar{S}_i$	$\delta$ , мм	$q_{II}$ , кал/мм
1	0,065	Рис. 3, а	3,33	0,2	17,46
2	0,085	Рис. 3, б	4,85	0,4	14,30
3	0,300	Рис. 3, а	3,33	1,0	21,80
4	0,600	То же	3,33	2,4	40,00

\* При  $K_x = 0,43 \text{ 1/мм}^2$ ,  $K_y = 0,03 \text{ 1/мм}^2$ ,  $b = 3 \text{ мм}$ ,  $H = 5 \text{ мм}$ .

где  $a_x$  и  $a_y$  — параметры технологического процесса, которые наряду с  $q_{II}$  определяются в результате расчета размеров зоны проплавления для соответствующих макроструктур поперечных сечений;  $H$  — желаемая глубина проплавления прослойки.

На рис. 5 и 6 даны примеры расчетов, с помощью которых можно продемонстрировать процедуру описываемого подхода при сварке встык с двух сторон пластины толщиной 20 мм из материала с пористой макроструктурой, имеющего характеристику  $P(S_i)$  по рис. 3.

На рис. 5 приведены макроструктуры моделируемых случайных сечений с характеристиками  $P(S_i)$  по рис. 3, а. Температурные поля и размеры зоны проплавления рассчитывались исходя из различных значений технологических параметров  $q_{II}$ ,  $K_y$  и  $K_x$ . На рис. 6 показаны результаты расчетов распределения максимальных температур в случай-

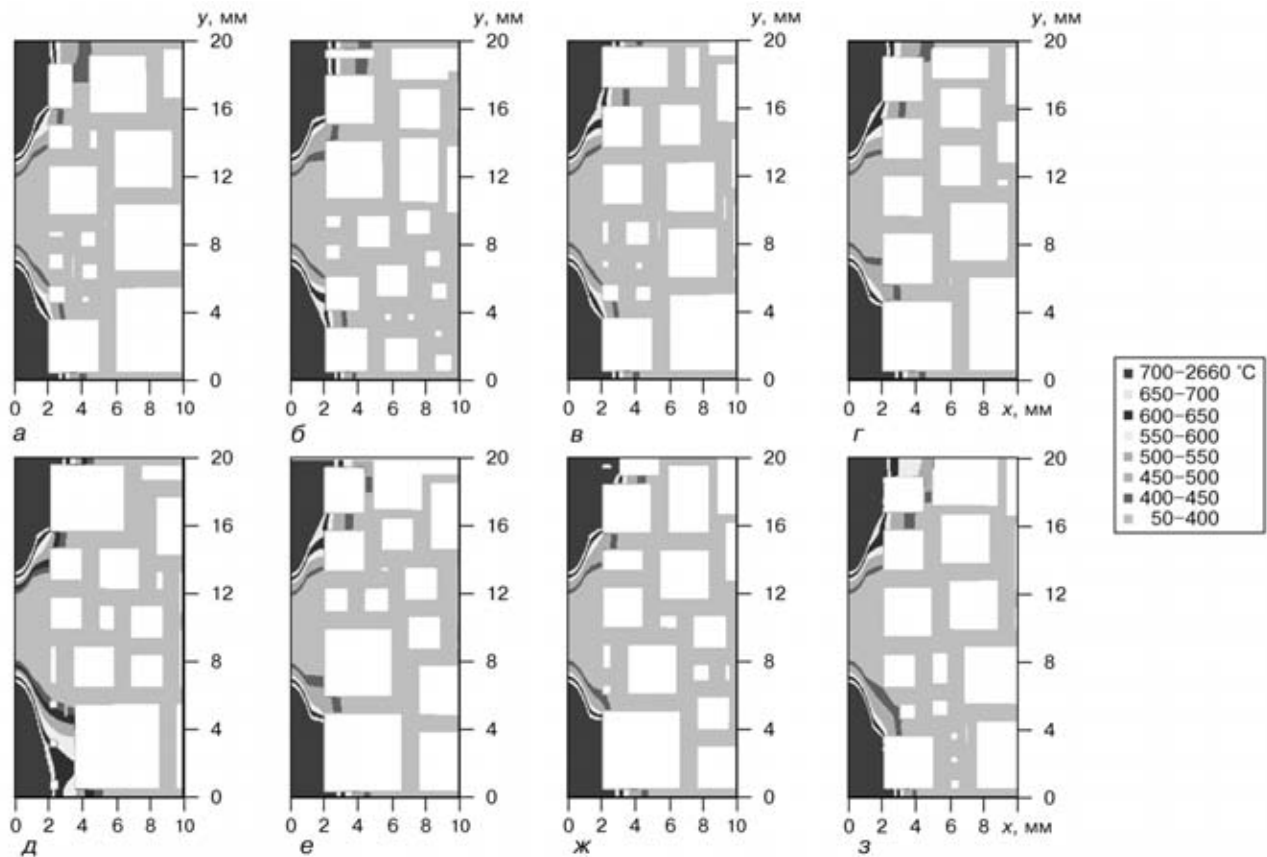


Рис. 6. Распределение максимальных температур в случайных сечениях (а-з) по рис. 5 при сварке материала с  $P(S_i)$  по варианту рис. 3, а



ных сечениях (см. рис. 5) при  $q_{\text{п}} = 21,80$  кал/мм,  $K_x = 0,43$  1/мм<sup>2</sup>,  $K_y = 0,03$  1/мм<sup>2</sup>,  $b = 3$  мм,  $H = 5$  мм. Указанные технологические параметры определены в результате численных экспериментов и близки к оптимальным из условий, что зона проплавления должна быть таковой, чтобы не разрушалась пористая структура. Зона проплавления определяется максимальными температурами 600...660 °С.

При других вариантах значений  $\gamma/\gamma_0$  и  $\bar{S}_i$  поступали аналогичным образом. Рекомендуемые значения  $q_{\text{п}}$  приведены в табл. 2.

Было определено, что увеличение пористости, т. е. значений  $1-\gamma/\gamma_0$ , требует более низких тепловложений из условия сохранения пористой макроструктуры основного материала в зоне соединения. Как следует из табл. 2, более низкие тепловложения необходимы также в случае одинаковых значений  $\gamma/\gamma_0$ , но больших значений  $\bar{S}_i$  (см. варианты № 1 и 2 в табл. 2).

### Выводы

1. При сварке пенистого алюминия рациональные режимы сварки зависят от пористости материала и в определенной степени от статистических характеристик размеров элементарных ячеек.

Suggested is the algorithm for numerical evaluation of temperature fields of a welded joint (penetration zone) in butt welding of elements with a foam microstructure. The algorithm is based on mathematical modelling of foam macrostructure using statistical data on sizes of pores. It is shown that welding conditions at a high porosity differ greatly from those for the case of a solid material.

2. Численные методы, основанные на знании стохастических характеристик макроструктуры пенистого материала, позволяют получить оценки рациональных режимов сварки. Однако достоверность таких оценок существенно зависит от адекватности математического описания указанной макроструктуры.

1. *Proceedings of the International Conference «Metal Foams and Porous Metal Structures» (Met Foam'99)*, Bremen, Germany, June, 14–16, 1999. — Bremen: Mit-Verlag, 1999. — 420 p.
2. *Alporas Aluminum Foam: Production Process, Properties, and Applications* // T. Miyoshi, M. Itoh, S. Akiyama, A. Kitahara // *Advanced Engineering Materials*. — 2000. — 2, № 4. — P. 179–183.
3. *High-Porosity Titanium, Stainless Steel and Supper alloy Parts* // M. Bram, C. Stiller, H. P. Buchkremer et al. // *Ibid.* — P. 196–199.
4. *Raabe D. Computational Materials Science // The simulation of Materials Microstructures and Properties*. — Germany: Willy-VCH, 1998. — 379 p.
5. *Olurin O. B., Fleck N. A., Ashby M. F. Joining of Metal Foams with Fosterer* // *Advanced Engineering Materials*. — 2000. — 2, № 8. — P. 521–525.
6. *Рыкалин Н. Н. Расчет тепловых процессов при сварке*. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
7. *Лифшиц Б. Г., Крапошин В. С., Литецкий Я. Л. Физические свойства металлов и сплавов*. — М.: Металлургия, 1980. — 320 с.
8. *Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача*. — М.: Энергия, 1975. — 485 с.

Поступила в редакцию 25.12.2001,  
в окончательном варианте 21.02.2002