

# РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ СОЕДИНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛАСТИН ЧЕРЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ПРОСЛОЙКИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ

**М.В. Кулинич<sup>1</sup>, Т.В. Запорожец<sup>2</sup>, А.М. Гусак<sup>2</sup>, А.И. Устинов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Черкасский национальный университет им. Богдана Хмельницкого. 18000, г. Черкассы, бульвар Шевченко, 81.

В работе представлены результаты численного моделирования тепловых полей в зоне соединения алюминиевых пластин через промежуточные прослойки в процессе локального нагрева зоны соединения плоским нагревателем, контактирующим с одной из пластин. В качестве промежуточной прослойки рассмотрены слои, состоящие из припоя, многослойной реакционной фольги или слоев обоих типов. Расчет выполнен с учетом теплофизических характеристик материала пластин, промежуточной прослойки и нагревателя, состоящего из многослойных реакционных фольг, в которых реакция самораспространяющегося высокотемпературного синтеза сопровождается интенсивным выделением тепла. Изучены условия локального нагрева алюминиевых пластин, необходимые для получения неразъемных соединений в процессе их пайки или сварки через промежуточную прослойку. Библиогр. 14, табл. 1, рис. 11.

*Ключевые слова:* пайка, сварка, алюминиевые сплавы, припой, многослойная фольга, тепловые поля, локальный разогрев, неразъемное соединение

Поиск новых подходов для устранения повреждений конструкций оболочкового типа из алюминиевых сплавов в условиях ограниченного доступа к мощным источникам тепла является актуальной задачей, решение которой позволит повысить их надежность и долговечность эксплуатации [1-3]. С этой точки зрения перспективной представляется идея присоединения к месту повреждения поверхности оболочки алюминиевой накладкой за счет локального нагрева зоны соединения источником тепла, обеспечивающим нагрев зоны соединения до температур, при которых создаются условия, необходимые для формирования соединения, например, плавление слоя припоя, размещенного в зоне соединения, или оплавление соединяемых поверхностей.

Известно, что в качестве источника тепла, который в автономном режиме может обеспечить необходимые условия для сварки или пайки материалов, могут быть использованы реакционные материалы, которые способны генерировать тепло в процессе прохождения в них реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [4-6]. При локальном разогреве зоны соединения тепло может рассеиваться в окружающую среду и распространяться по элементам конструкции. Для обеспечения разогрева зоны соединения предпочтительно использовать материалы с высокой интенсивностью теплообразования.

Поскольку интенсивность теплообразования в таких материалах существенно зависит от скорости протекания в них реакции СВС, то использование для этих целей термитных смесей представляется менее эффективным по сравнению с многослойными фольгами (МФ), состоящими из высокорекционных материалов. В термитных смесях скорость распространения реакции СВС низкая из-за малой площади контакта между порошковыми компонентами и наличия на их поверхности оксидных пленок [7]. В случае МФ реакционные слои контактируют друг с другом по всей поверхности фольги, что обеспечивает скорость распространения фронта реакции СВС на 1-2 порядка выше по сравнению с порошковыми термитными смесями [8-10]. Такие свойства реакционных МФ позволяют использовать их как в качестве промежуточной прослойки для разогрева соединяемых поверхностей алюминиевых пластин, так и в качестве нагревателя, контактирующего с одной из пластин (накладкой), для локального разогрева зоны соединения.

Вместе с тем для применения такого подхода к получению неразъемных соединений необходимо учитывать, что поток тепла, непрерывно поступающий из нагревателя через пластину-накладку в зону соединения, отводится из нее во вторую пластину (оболочку). Если в зоне соединения находится, например, прослойка припоя, то важно установить не только нижний предел мощности

нагревателя, при котором можно расплавить припой, но и не превысить верхний предел, при котором возможно оплавление материала накладки, контактирующей с нагревателем.

Ясно, что на распространение тепла в таких системах влияют как теплофизические свойства материала элементов системы, так и теплопередача (тепловые сопротивления) на границах между ними. При этом теплофизические параметры, как правило, известны, тогда как параметры теплопередачи между элементами системы существенно зависят от ряда факторов (шероховатости поверхностей, усилия их прижатия друг к другу и т. п.), которые могут изменяться в широких пределах. Поэтому провести расчет тепловых полей в таких системах в общем случае затруднительно. Ранее проведенные исследования температурных полей в условиях неидеальных контактов между элементами системы показали [11], что время перераспределения тепла в таких условиях существенно увеличивается. Однако общие закономерности изменения температурных полей подобны.

В связи с этим, в работе для выяснения влияния теплофизических характеристик материалов исследуемой системы на тепловые поля в процессе соединения алюминиевых пластин через промежуточные прослойки на основе слоев припоя или многослойной высокорекреакционной фольги предположили, что контакты между элементами системы идеальные. Это позволило выяснить предельно допустимые значения параметров нагревателя с высокой интенсивностью тепловыделения, обеспечивающего тепловые условия для получения неразъемных соединений алюминиевых пластин.

**Метод расчета тепловых полей.** Схема соединения пластин через промежуточную прослойку, путем локального разогрева зоны соединения за счет контакта нагревателя с одной из пластин (далее накладка), представлена на рис. 1. Если нагреватель *1* с размером, например,  $0,05 \times 0,05 \text{ м}^2$ , состоит из пакета МФ на основе слоев Ni и Al с эквипотенциальным соотношением элементов, для которых характерна высокая скорость протекания реакции синтеза, порядка  $1 \dots 3 \text{ м/с}$  [8], обеспечивающая его разогрев до определенной (адиабатической) температуры, свойственной химическому составу и структуре МФ за короткое время, порядка  $0,005 \dots 0,015 \text{ с}$ , то временем разогрева нагревателя до максимальной температуры можно пренебречь.

При анализе тепловых полей исходили из того, что в зоне соединения разогрев соединяемых поверхностей должен достигать температуры, при которой становится возможным протекание про-

цессов, необходимых для формирования неразъемного соединения между этими поверхностями. Так, для соединения пластин путем пайки, температура в зоне контакта должна быть выше температуры плавления припоя, а в случае сварки — выше температуры плавления материала пластин.

Анализ тепловых полей выполнен на примере соединения алюминиевых пластин из сплава АМгб. В качестве источника тепла рассмотрен пакет, состоящий из МФ на основе слоев Ni и Al с эквипотенциальным соотношением элементов. Такие же МФ были рассмотрены в качестве промежуточных прослоек для локального разогрева зоны соединения. В качестве припоя использовали модельный сплав эвтектического состава с температурой плавления 850 К. Теплофизические характеристики материалов в системе «нагреватель—накладка (1-я пластина)—промежуточный слой—2-я пластина (оболочка)» представлены в таблице.

При моделировании тепловых полей в зоне соединения алюминиевых пластин в качестве промежуточной прослойки рассматривали слои из припоя, МФ и наличие слоев обоих типов. Если предположить, что все элементы системы имеют неограниченный размер по двум координатам, параллельным плоскости соединения и ограниченный размер в перпендикулярном направлении, то это позволяет анализировать перераспределение тепла только в одном направлении — перпендикулярном к плоскости контакта.

Все элементы системы разделили на ячейки конечной толщины  $\Delta x$ , за исключением промежуточной прослойки, которую рассматривали как одну ячейку толщиной  $L$ , в случае прослойки на основе припоя или толщиной  $H$  — для реакционной МФ, и двух ячеек толщиной  $L+H$ , если промежуточная прослойка состоит из слоя припоя и МФ. Все расчеты были выполнены при разделении системы

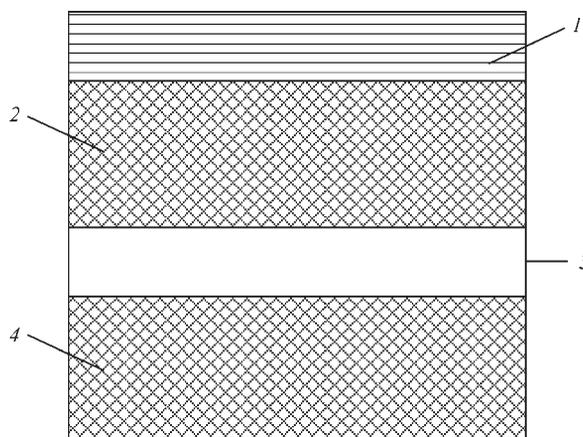


Рис. 1. Схема соединения пластин при их нагреве в результате контакта накладки с нагревателем: 1 — нагреватель; 2 — накладка; 3 — промежуточная прослойка; 4 — оболочка в виде пластины

Характеристики материалов системы «нагреватель–накладка–промежуточный слой–оболочка»

Параметры. Свойства	Материал			
	Многослойная фольга Ni/Al (нагреватель)	Алюминиевый сплав АМг6 (накладка и 2-я пластина (оболочка))	Модельный припой (промежуточная прослойка)	Многослойная фольга Ni/Al (промежуточная прослойка)
Толщина, мм	1...16	5...17	0,1	0,05...0,35
Удельный вес, кг/м <sup>3</sup>	5164	2650	2650	5164
Теплопроводность, Вт/м·К	51	126	155	51
Адиабатическая температура СВС реакции, К	1912	–	–	1912
Температура плавления припоя, К	–	–	850	–
Скрытая теплота плавления, кДж/кг	–	400	555	–
Теплота образования интерметаллида, эВ	0,46	–	–	0,46
Период модуляции слоев в многослойной фольге, нм	100	–	–	100
Толщина многослойной фольги, мкм	200	–	–	50...350
Энергия активации взаимной диффузии между слоями Al и Ni, эВ	1,69	–	–	1,69

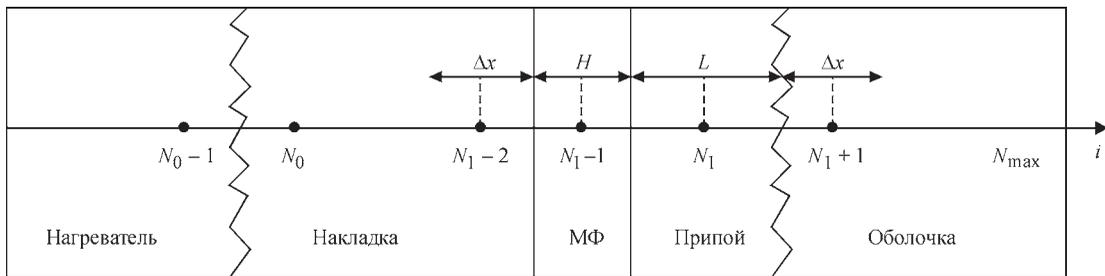


Рис. 2. Схема разделения системы «нагреватель–накладка–промежуточная прослойка–оболочка» на ячейки

на ячейки толщиной 200 мкм. Нумерация ячеек представлена на рис. 2.

Если предположить, что излучение тепловой энергии за пределы системы отсутствует, то для крайних ячеек системы будут выполняться граничные условия второго рода:

$$T_0 = T_1, T_{N_{\max}} = T_{N_{\max}-1},$$

где  $N_{\max}$  — максимальный номер ячейки:

$$N_{\max} = L_0/\Delta x + L_1/\Delta x + L_2/\Delta x + 2,$$

где  $L_0$  — толщина нагревателя;  $L_1$  — толщина накладки;  $L_2$  — толщина оболочки.

Для определения температуры в каждой ячейке необходимо решить уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

с учетом теплофизических свойств материалов ячеек, где  $a$  — температуропроводность материала ячейки.

Уравнение теплопроводности (1) имеет решение для всех ячеек системы шириной  $\Delta x$ :

$$T_i = T_i^{old} + a \frac{T_{i+1}^{old} - 2T_i^{old} + T_{i-1}^{old}}{\Delta x^2} dt, \quad (2)$$

где  $T_i$  — температура  $i$ -й ячейки, которую она достигает в течение  $dt$  секунд по сравнению с исходной температурой  $T_i^{old}$ . Это соотношение справедливо для всех ячеек, за исключением  $N_0 - 1$ ,  $N_0$ ,  $N_1 - 2$ ,  $N_1 - 1$ ,  $N_1$  и  $N_1 + 1$ , которые относятся к разным элементам системы. Для определения температуры в ячейках на границе контактов полагали, что тепловой поток пропорционален разности температур в пограничных ячейках  $i$  и  $i+1$ , перенос тепла между которыми характеризуется эффективным «коэффициентом переноса тепла»  $\mu_{i,i+1}$ , в соответствии с соотношением

$$J_{i,i+1} = -\mu_{i,i+1} (T_{i+1} - T_i).$$

В случае идеального теплового контакта между ячейками  $i$  и  $i+1$ , относящимися к различным элементам системы с коэффициентами теплопроводности их материала  $k_i$  и  $k_{i+1}$ , толщиной  $h_i$  и  $h_{i+1}$ , соответственно, коэффициент переноса тепла определяется как

$$\mu_{i,i+1} = \frac{2k_i k_{i+1}}{k_i h_{i+1} + k_{i+1} h_i}. \quad (3)$$

Тогда уравнение (2) для определения температуры в пограничных ячейках можно определить исходя из системы уравнений, которые учитывают тепловые потоки между граничными и соседними к ним ячейками

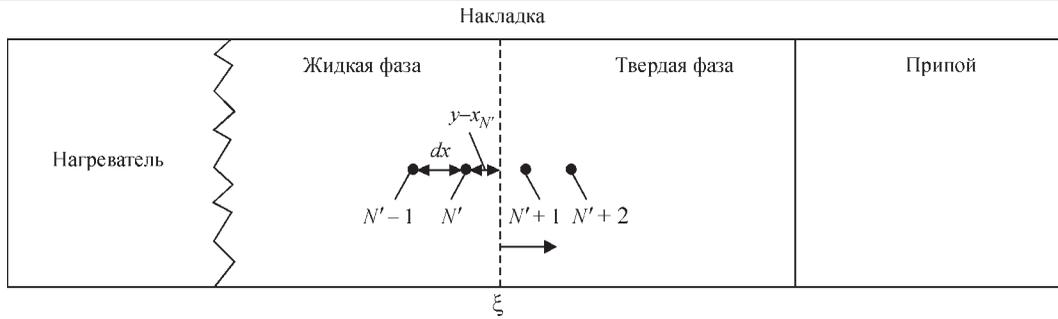


Рис. 3. Схематическое изображение границы раздела между жидкой и твердой частями пластины в процессе ее плавления

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{c_i \rho_i} (J_{i-1,i} - J_{i,i+1}),$$

$$\frac{dT_{i+1}}{dt} = \frac{1}{c_{i+1} \rho_{i+1}} (J_{i,i+1} - J_{i+1,i+2}),$$

$$\frac{T_{N'+1}^{new} - T_{N'+1}^{old}}{dt} = a \frac{l}{\rho_{pl}} \frac{\frac{T_{N'+2}' - T_{N'+1}'}{dx} - \frac{T_{N'+1}' - T^{melt}}{x_{N'+1}' - \xi}}{\frac{(x_{N'+2}' - \xi)}{2}}. \quad (4)$$

где  $c_i$  и  $\rho_i$  — теплоемкость и удельный вес материала  $i$ -й ячейки.

Так как источник тепла может иметь температуру, которая превышает температуру плавления материала ( $T^{melt}$ ) пластины-накладки, то необходимо учесть возможность частичного или полного ее плавления. Пусть при частичном расплавлении пластины граница между жидкой и твердой фазой будет расположена в точке  $\xi (x_N < \xi < x_{N+1})$  (рис. 3). Тогда распределение температуры слева и справа от границы можно рассчитать из баланса тепловых потоков с учетом того, что за время  $dt$  граница сместится на величину  $dy$ .

$$J_l^Q S dt - J_s^Q S dt = \lambda \rho_{pl} S dy, \quad (5)$$

где  $\lambda_{pl1}, \lambda_{pl2}, \rho_{pl1}, \rho_{pl2}$  — удельная теплота плавления и плотность материала пластин;  $S$  — площадь поперечного сечения;  $dy$  — изменение положения границы.

С учетом коэффициентов переноса тепла в жидкой ( $l$ ) и твердой ( $s$ ) фазах уравнение (5) можно представить как

$$\frac{dy}{dt} = \frac{J_l^Q - J_s^Q}{\lambda \rho_{pl}} = \frac{\kappa_1^l \frac{\partial T^l}{\partial x} + \kappa_1^s \frac{\partial T^s}{\partial x}}{\lambda \rho_{pl}}. \quad (6)$$

Тогда изменение температуры ячеек  $N'$  и  $N'+1$  за время  $dt$  можно рассчитать, исходя из уравнений

$$\frac{T_{N'}^{new} - T_{N'}^{old}}{dt} = a \frac{l}{\rho_{pl}} \frac{\frac{T^{melt} - T_{N'}'}{\xi - x_{N'}'} - \frac{T_{N'}' - T_{N-1}'}{dx}}{\frac{(\xi - x_{N-1}')}{2}}, \quad (7)$$

Такие вычисления необходимо проводить на каждом шаге по времени, и одновременно следить за положением границы. Новое положение границы жидкой и твердой фаз будем рассчитывать из формулы

$$\xi^{new} = \xi + \frac{dt}{\lambda \rho_{pl}} \times \left( \kappa_1^s \frac{T_{N'+1}' - T^{melt}}{x_{N'+1}' - \xi} - \kappa_1^l \frac{T^{melt} - T_{N'}'}{\xi - x_{N'}'} \right). \quad (9)$$

Температура ячеек пластины, которые находятся слева и справа от границы раздела фаз (за исключением приграничных слоев) рассчитываются по формуле (4), но с разными коэффициентами теплопроводности:  $\kappa_1^l$  для расплавленной части и  $\kappa_1^s$  для твердой части пластины.

В случае, когда припой, находящийся в промежутке между пластинами, частично расплавляется, уравнения для расчета температуры в соседних ячейках будут аналогичны (5)–(9), только коэффициент теплопроводности, свойственный твердой фазе  $\kappa_1^s$  припоя, необходимо изменить на коэффициент теплопроводности жидкой фазы  $\kappa_1^l$ .

При частичном расплавлении припоя положение границы жидкая–твердая фаза можно описать параметром  $\eta (0 < \eta < 1)$ , как показано на рис. 4.

Учесть тепловые потери/поступления при плавлении/кристаллизации можно из разницы потоков тепла. Изменение тепла может быть пересчитано на долю расплава в соседстве с ячейкой пластины

$$(J_{in}^Q - J_{out}^Q) dt = S \rho_{II} \lambda_{II} L d\eta, \quad (10)$$

где  $\lambda_{II}$  — удельная теплота плавления припоя;  $\rho_{II}$  — плотность припоя;  $S$  — площадь поперечно-

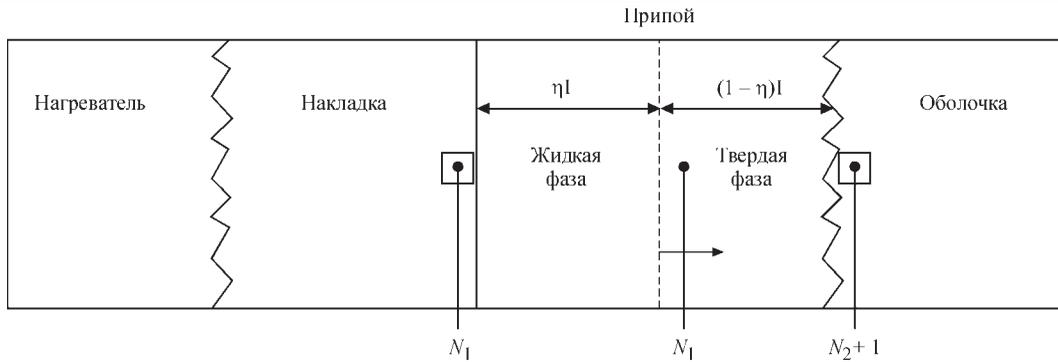


Рис. 4. Схематическое изображение положения границы раздела между жидкой и твердой фазой припоя при его частичном расплавлении  $\eta$

го сечения;  $L$  — толщина слоя припоя;  $d\eta$  — изменение доли расплавленного припоя;  $J_{in}^Q, J_{out}^Q$  — тепловые потоки, входящие и выходящие из расплавленного припоя, соответственно.

Величину тепловых потоков на границах между ячейкой, контактирующей с расплавленным припоем и припоем, и между припоем в твердой фазе и соседней ячейкой оболочки можно представить как

$$J_{in}^Q = -S\kappa_1^s \frac{T_x - T_{N_1}}{dx/2}, \quad (11)$$

$$J_{out}^Q = -S\mu_1 (T_{N_{2+1}} - T_{evt}). \quad (12)$$

где  $T_{evt}$  — температура плавления припоя.

Значение температуры на границе между пластиной и расплавом можно определить из равенства тепловых потоков из пластины в расплав припоя и из расплава в твердую фазу припоя

$$-\kappa_1^s \frac{(T_x - T_{N_1})}{dx/2} = -\kappa_1^l \frac{(T_{evt} - T_x)}{\eta L}. \quad (13)$$

Изменение положения границы расплава припоя за время  $dt$  можно рассчитать из уравнения

$$\eta_i^{new} = \eta_i + \frac{dt}{\rho_{II} \lambda_{II} L} \times \left( \frac{2\kappa_1^s \kappa_1^l}{2\kappa_1^s \eta L + \kappa_1^l dx} (T_{N_1} - T_{evt}) + \mu_1 (T_{N_{2+1}} - T_{evt}) \right). \quad (14)$$

Изменение температуры на границах с пластинами с учетом частичного плавления или кристаллизации припоя можно рассчитать из выражений:

$$T_{N_1}^{new} = T_{N_1} + \frac{dt}{dx \rho_{pl1} c_{pl1}} \times \left( -\frac{\kappa_1^s}{dx} (T_{N_1} - T_{N_{1-1}}) + \frac{2\kappa_1^s \kappa_1^l}{\kappa_1^s \eta L + \kappa_1^l dx} (T_{N_{1+1}} - T_{N_1}) \right), \quad (15)$$

$$T_{N_{2+1}}^{new} = T_{N_{2+1}} + \frac{dt}{dx \rho_{pl2} c_{pl2}} \times \left( \mu_1 (T_{evt} - T_{N_{2+1}}) + \frac{\kappa_1^l}{dx} (T_{N_{2+2}} - T_{N_{2+1}}) \right). \quad (16)$$

Если в состав промежуточной прослойки входит МФ на основе реакционных элементов, то в процессе нагрева в фольге будут инициированы диффузионные процессы между слоями реакционных элементов, приводящие к образованию интерметаллических соединений. Поскольку этот процесс будет сопровождаться выделением тепла, контактирующие с фольгой ячейки будут нагреваться не только потоком тепла от нагревателя, но и от МФ.

Используя Вагнеровский коэффициент диффузии [12] и закон роста фаз при реакционной диффузии [13], можно определить толщину прослойки интерметаллидной фазы, которая образуется на границе слоев реакционных элементов,  $d\Delta y$  в течение интервала времени  $dt$ , как

$$d\Delta y = \frac{D_0 \Delta g}{k_B T_{N_1} c(1-c)} \exp\left(-\frac{Q}{k_B T_{N_1}}\right) dt,$$

где  $T_{N_1}$  — температура промежуточной прослойки с многослойной структурой в начальный момент времени.

Изменение температуры в ячейке фольги в результате такого фазового превращения определяется как

$$T_{N_1} = T_{N_1} + \frac{d\Delta y \Delta g}{2l \ 3k_B},$$

где  $\Delta g$  — теплота образования интерметаллидной фазы в процессе реакции синтеза в многослойной структуре с периодом модуляции  $2l$ . При этом необходимо учитывать, что процесс тепловыделения начинается при толщине прослойки новой фазы  $\Delta y = \Delta y_0$  и продолжается до полного превращения МФ в интерметаллид.

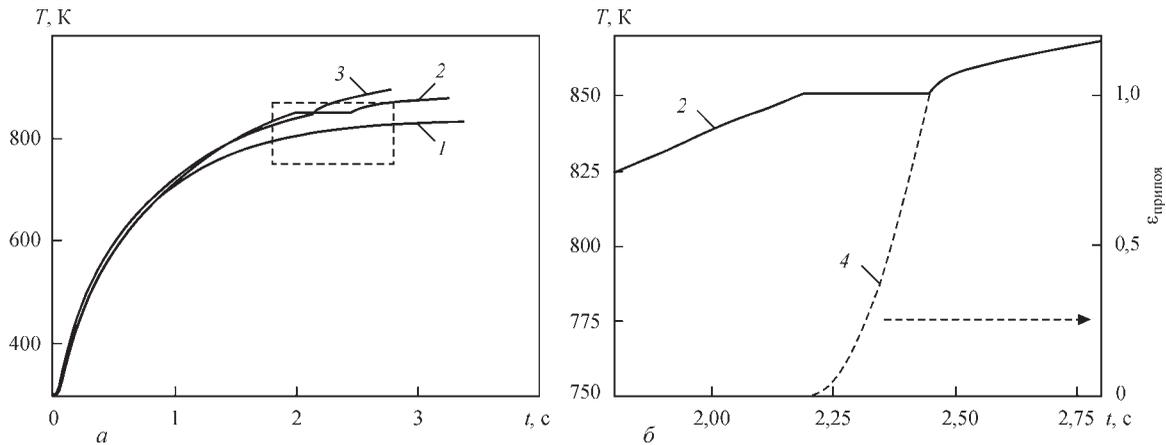


Рис. 5. Изменения температуры в промежуточной прослойке толщиной 100 мкм на основе «эвтектического сплава» (температура плавления 850 К) в зависимости от толщины нагревателя с адиабатической температурой СВС реакции 1600 К: 1 —  $d = 5$  мм; 2 — 6; 3 — 7 (а); на вставке представлена зависимость объемной доли расплава  $\epsilon_{\text{припоя}}$  в прослойке припоя (кривая 4) в процессе локального разогрева зоны соединения для кривой 2 (б)

Если в состав промежуточной прослойки входит слой припоя, то в расчете учитывалось поглощение тепловой энергии в этом слое, которое расходуется на его нагрев и плавление.

На основе такой схемы расчета теплового поля в системе можно определить как пространственное распределение температуры, так и ее изменение в заданной точке в зависимости от времени процесса локального разогрева.

В рамках этой схемы были исследованы распределения температуры в процессе получения неразъемных соединений алюминиевых пластин путем пайки или сварки при условии, что в зоне контактов нагревателя с накладкой и накладки с оболочкой существуют контакты, коэффициенты переноса тепла между ними описываются соотношением (3).

**Результаты расчета.** Изменение температуры в промежуточной прослойке, состоящей из слоя припоя в процессе локального разогрева зоны соединения представлено на рис. 5.

Видно, что толщина нагревателя оказывает влияние на особенности изменения температуры промежуточной прослойки: при толщине нагревателя меньше некоторой критической величины (при выбранных параметрах системы это соответствует толщине нагревателя 5 мм) температура в промежуточной прослойке монотонно повышается, однако не достигает температуры плавления припоя, а при толщине больше критической (6 мм) — на температурной зависимости наблюдается участок замедленного роста температуры. На рис. 5 можно видеть, что эта «площадка» на температурной зависимости соответствует плавлению припоя. В процессе выдержки при этой температуре объемная доля расплавленного припоя увеличивается. Дальнейшее повышение тем-

пературы в промежуточной прослойке наблюдается только после полного расплавления припоя.

На этом основании можно предположить, что для обеспечения температурного режима пайки толщина нагревателя должна превышать некоторый нижний предел. Однако если использовать нагреватель большей толщины, например, 9 мм, то температура в зоне контакта после полного расплавления припоя будет продолжать повышаться вплоть до температуры плавления алюминиевого сплава (рис. 6). В результате этого происходит частичное оплавление пластины-накладки, контактирующей с нагревателем.

Таким образом, для обеспечения условий, необходимых для пайки, толщина нагревателя должна находиться между нижним и верхним пределами, что позволяет расплавить припой, но не приведет к оплавлению пластины-накладки.

Поскольку интенсивность теплового потока, распространяющегося от нагревателя к пластине-накладке зависит не только от толщины нагревателя, но и от адиабатической температуры, которой он достигает в результате прохождения в нем реакции СВС, в работе были определены значения нижнего и верхнего пределов толщины нагревателя в зависимости от его температуры в диапазоне 1300...1600 К. При этом нижний предел соответствует условию, при котором происходит плавление припоя без оплавления слоев накладки, контактирующих с нагревателем, верхний предел — при условии частичного (до 10 %) оплавления накладки.

Из рис. 7 видно, что по мере повышения адиабатической температуры нагревателя значения нижнего и верхнего пределов его толщины уменьшаются, как и разница между этими пределами. При температуре нагревателя более 1600 К ча-

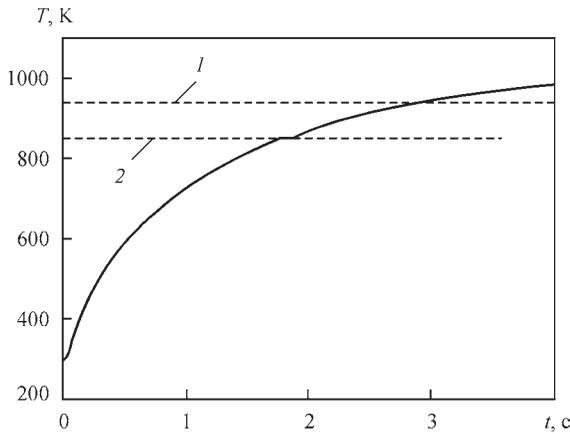


Рис. 6. Изменение температуры в промежуточной прослойке толщиной 100 мкм на основе «эвтектического сплава» (температура плавления 850 К) при локальном нагреве пластин нагревателем толщиной 9 мм (адиабатическая температура нагревателя 1600 К): 1 — температура плавления алюминиевых пластин, 2 — температура плавления припоя

стичное оплавление пластины-накладки наблюдается уже при толщинах менее нижнего предела.

Основываясь на этом, можно заключить, что существуют определенные ограничения не только на выбор толщины нагревателя, но и адиабатическую температуру, которой он достигает в результате протекания в нем реакции СВС.

Распределение температуры по толщине поперечного сечения сборки на различных стадиях ее разогрева представлено на рис. 8 для случая использования нагревателя, удовлетворяющего указанным выше требованиям. Видно, что для таких нагревателей на всех стадиях процесса локального нагрева зоны соединения температура в зоне контакта нагревателя и пластины-накладки остается практически неизменной, и ее величина меньше температуры плавления материала пластины (сплава АМгб).

Качественно иной вид изменений температуры наблюдается в случае, когда промежуточная

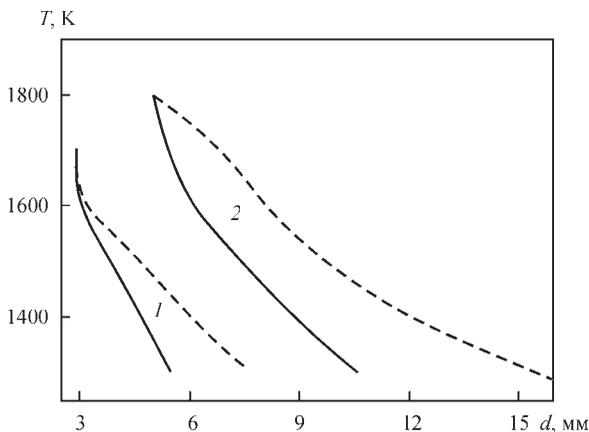


Рис. 7. Зависимость нижнего (сплошная линия) и верхнего (пунктирная) значения пределов толщины нагревателя от его адиабатической температуры: 1 — оптимальная толщина нагревателя для соединения алюминиевых пластин толщиной 5 мм; 2 — 10 мм

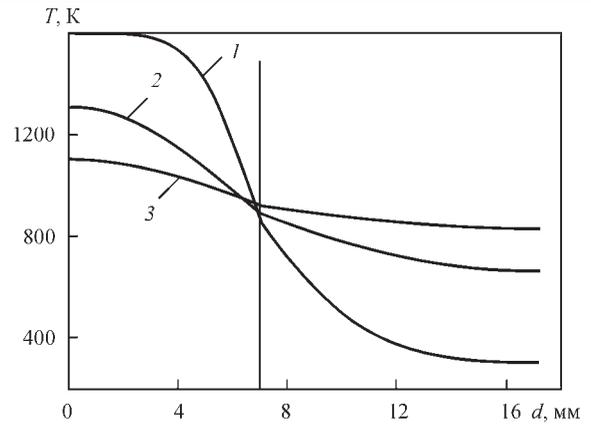


Рис. 8. Распределение температуры в поперечном сечении сборки, состоящей из нагревателя толщиной 7 мм, пластины-накладки — 5 мм, промежуточной прослойки — 100 мкм и второй пластины — 5 мм, на различных стадиях процесса пайки: 1 — 0,1 с процесса; 2 — 1; 3 — 1,9

прослойка состоит из МФ на основе реакционных элементов. Как видно из рис. 9, при нагреве такой промежуточной прослойки характер изменения ее температуры зависит от толщины нагревателя. При толщине нагревателя порядка 1 мм нагрев промежуточной прослойки происходит монотонно. При увеличении толщины нагревателя — на температурной зависимости наблюдается резкое увеличение температуры, которое после достижения некоторого пикового значения снижается до уровня монотонной зависимости, подобной той, которая характерна для локального разогрева пластин в случае использования промежуточных прослоек на основе припоя.

Согласно работе [14] такое резкое повышение температуры в промежуточной прослойке с многослойной структурой на основе реакционных элементов может быть связано с инициированием в фольге реакции теплового взрыва (ТВ), при которой процесс высокотемпературного синтеза протекает во всем ее объеме без дополнительного

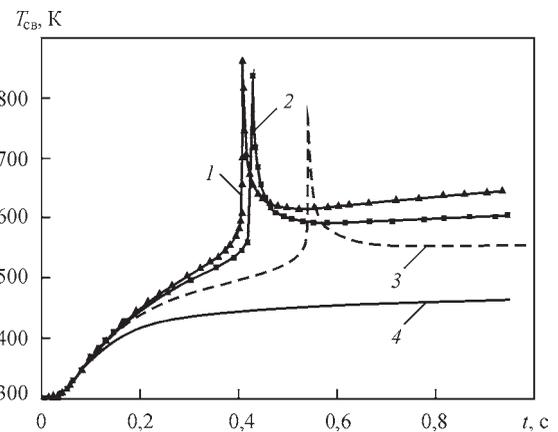


Рис. 9. Изменения температуры в промежуточной прослойке на основе МФ на основе Ni/Al (толщиной 200 мкм с периодом 100 нм) в зависимости от времени прохождения реакции с разной толщиной нагревателя: 1 —  $d = 2.5$  мм; 2 — 2; 3 — 1,5; 4 — 1, разогретого до температуры 1600 К

подвода тепла. Для иницирования ТВ существует пороговое значение скорости нагрева МФ: при скоростях нагрева МФ меньше порогового реакция синтеза развивается в режиме твердофазной реакции, требующей постоянного подвода тепла, а при больших скоростях нагрева образующееся в результате высокотемпературного синтеза тепло обеспечивает протекание этой реакции без внешнего подвода тепла. Поэтому при малых скоростях нагрева, которые реализуются в случае применения нагревателя толщиной 1 мм, ТВ не иницируется, тогда как при увеличении скорости нагрева за счет нагревателя толщиной 1,5 мм иницируется ТВ, сопровождаемый резким повышением температуры в зоне соединения. При дальнейшем повышении скорости нагрева МФ за счет увеличения толщины нагревателя величина температурного пика возрастает, а время его иницирования смещается ближе к началу процесса разогрева.

Возможность разогрева зоны соединения алюминиевых пластин за счет тепла, выделяемого при ТВ в МФ, была исследована с точки зрения создания тепловых условий для оплавления алюминиевых слоев, контактирующих с МФ, что является необходимым условием для сварки плавлением. На рис. 10 представлены распределения температуры в поперечном сечении сборки в момент иницирования в МФ реакции синтеза в режиме ТВ. Видно, что с увеличением толщины МФ температура в зоне соединения при иницировании ТВ возрастает. При этом наблюдается значительное повышение температуры в промежуточной прослойке и участках соединяемых пластин, контактирующих с МФ. При толщине промежуточной прослойки более 200 мкм температура слоев алюминиевого сплава, контактирующих с МФ, становится выше температуры его плавления. Можно

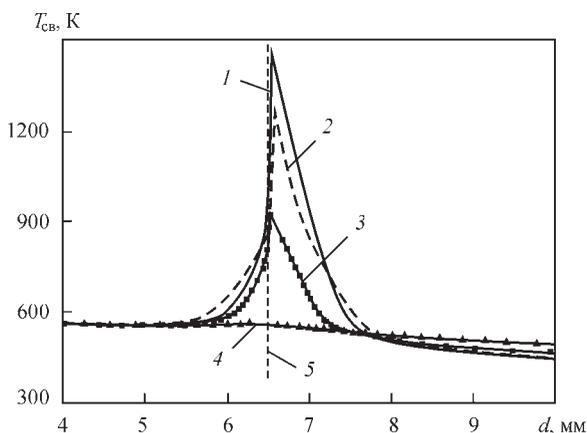


Рис. 10. Распределение температуры в поперечном сечении сборки, состоящей из нагревателя, накладки, промежуточной прослойки на основе МФ и оболочки, в момент иницирования в ней ТВ (толщина нагревателя 1,5 мм) с разной толщиной МФ: 1 —  $df = 350$  мкм; 2 — 300; 3 — 200; 4 — 100; 5 — зона между пластиной-накладкой и МФ

предположить, что такие температурные условия на границе между МФ и алюминиевой пластиной могут способствовать оплавлению ее поверхностных слоев.

Следовательно, при использовании в качестве промежуточной прослойки МФ в результате иницирования в ней реакции синтеза в режиме ТВ можно обеспечить дополнительный разогрев слоев алюминиевых пластин, контактирующих с МФ. За счет увеличения толщины МФ количество тепла, образующегося при этом, может обеспечить оплавление алюминиевых пластин, необходимых для их сварки.

Обращает внимание то, что для режима сварки толщина нагревателя может быть существенно меньше, чем в случае соединения пластин в режиме пайки. Основываясь на этом, была рассмотрена возможность использования ТВ для обеспечения тепловых условий, необходимых для пайки в случае, когда в качестве промежуточной прослойки использовали слои из припоя и МФ.

На рис. 11 представлено распределение температуры в поперечном сечении сборки, состоящей из слоя МФ и слоя на основе припоя, в момент времени иницирования ТВ. Видно, что в результате ТВ в промежуточной прослойке температура резко увеличивается до величин, превышающих температуру плавления припоя. Исходя из этого, можно предположить, что такая структура промежуточной прослойки позволяет уменьшить толщину нагревателя по сравнению с процессом пайки через промежуточную прослойку на основе припоя и, как следствие этого, снизить температуру, до которой будет нагреваться сборка в целом.

Установленные выше параметры, характеризующие нагреватель, и их связь с параметрами про-

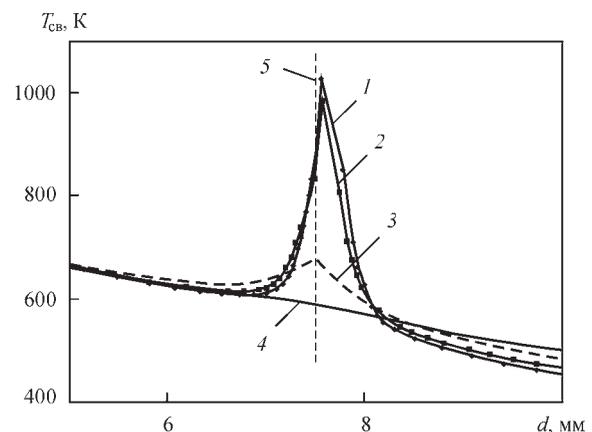


Рис. 11. Распределение температуры в поперечном сечении сборки, состоящей из нагревателя, накладки, промежуточной прослойки на основе слоя МФ, слоя припоя (толщина припоя 100 мкм) и оболочки в момент иницирования в МФ ТВ (толщина нагревателя 2,5 мм) с разной толщиной МФ: 1 —  $df = 200$  мкм; 2 — 150; 3 — 100; 4 — 50; 5 — зона между пластиной-накладкой и МФ

межуточной прослойки и толщиной соединяемых пластин были получены для случая соединения пластин толщиной 5 мм. Для выяснения возможности применения этого подхода для соединения пластин большей толщины в работе рассчитаны температурные поля, необходимые для реализации такой схемы соединения. Оказалось, что основные закономерности локального разогрева зоны соединения с помощью нагревателя, контактирующего с пластиной-накладкой, сохраняются при условии увеличения толщины нагревателя пропорционально увеличению толщины соединяемых пластин, вплоть до 20 мм.

## Выводы

1. Показано, что при локальном разогреве зоны соединения алюминиевых пластин из сплава АМг6 толщиной до 20 мм нагревателем на основе МФ, контактирующим с одной из них (пластиной накладкой), можно обеспечить температурные условия, необходимые для плавления припоя, расположенного в зоне соединения без расплавления алюминиевой пластины.

2. Для обеспечения температурных условий, необходимых для процесса пайки алюминиевых пластин через промежуточную прослойку на основе припоя при локальном разогреве зоны соединения нагревателем, контактирующим с одной из пластин, его толщина должна быть больше некоторой критической величины, зависящей от адиабатической температуры нагревателя, характеристик промежуточного слоя на основе припоя и толщины пластины.

3. Показано, что существует верхняя граница адиабатической температуры нагревателя, выше которой оплавление материала пластины-накладки может наступать раньше, чем расплавится слой припоя, расположенный в зоне соединения.

4. Применение в качестве промежуточной прослойки многослойной фольги, например, Ni/Al, с высокой реакционной способностью может обеспечить температурные условия для протекания процесса сварки за счет локального оплавления контактирующих с прослойкой слоев алюминиевого сплава в результате инициирования в фольге реакции синтеза по схеме теплового взрыва (объемной реакции синтеза) при локальном разогреве зоны соединения нагревателем, контактирующим с пластиной накладкой.

5. Применение в качестве промежуточной прослойки многослойной фольги с высокой реакционной способностью, например, Ni/Al, в сочетании со слоем припоя, позволяет уменьшить толщину нагревателя, необходимую для обеспечения температурных условий для процесса пайки

за счет дополнительного тепловыделения в МФ при инициировании в ней высокотемпературного синтеза в режиме теплового взрыва.

## Литература/References

- Ищенко А.Я. (2004) Особенности применения алюминиевых высокопрочных сплавов для сварных конструкций. *Автоматическая сварка*, **9**, 16–26.  
Ishchenko, A.Ya. (2004) Specifics in application of aluminium high-strength alloys for welded structures. *The Paton Welding J.*, **9**, 15–25.
- Кривцун І.В., Квасницький В.В., Максимов С.Ю., Ермолаєв Г.В. (2017) *Спеціальні способи зварювання*. Патон Б.С. (ред.). Миколаїв, НУК.  
Krivtsun, I.V., Kvasnytsky, V.V., Maksymov, S.Yu., Ermolaev, G.V. (2017) *Special methods of welding*. Ed. by B.E. Paton. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
- Ищенко А.Я. (2002) Исследование и разработки технологии сварки легких сплавов в ИЭС им. Е.О. Патона. *Автоматическая сварка*, **1**, 30–31.  
Ishchenko, A.Ya. (2002) Investigation and development of the technology of light alloy welding at the PWI. *The Paton Welding J.*, **1**, 25–26.
- Subramanian J.S., Rodgers P., Newson J. (2005) Room temperature soldering of microelectronic components for enhanced thermal performance. *6th. International Conferences on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems «EuroSimE»*. Berlin, 681–686.
- Ramos A.S., Vieira M.T., Simões S. et al. (2010) Reaction-assisted diffusion bonding of advanced materials. *Defect and Diffusion Forum*. **297–301**, 972–977.
- Weihls T., Barmak K., Coffey K. (2014) Fabrication and characterization of reactive multilayer films and foils. *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications: Structure, Processing and Properties*, **0**, 160–243.
- Seshadri R. (2000) Centrifugal casting of metals and ceramics using thermite reactions. *Metals Materials And Processes*, **1**, 233–240.
- Кравчук М.В., Устинов А.И. (2015) Влияние термодинамических и структурных параметров многослойных фольг на характеристики процесса СВС. *Автоматическая сварка*, **8**, 10–15.  
Kravtchuk, M.V., Ustinov, A.I. (2015) Influence of thermodynamic and structural parameters of multilayer foils on SHS process characteristics. *The Paton Welding J.*, **8**, 8–13.
- Knepper R., Snyder M., Fritz G. et al. (2009) Effect of varying bilayer spacing distribution on reaction heat and velocity in reactive Al/Ni multilayers. *Journal of Applied Physics*, **0**, 083504-1–083504-9.
- Запорожец Т.В., Гусак А.М., Устинов А.И. (2010) Моделирование стационарного режима реакции СВС в нанослойных материалах (феноменологическая модель). 1. Одностадийная реакция. *Современная электрометаллургия*, **1**, 40–46.  
Zaporozhets, T.V., Gusak, A.M., Ustinov, A.I. (2010) Modeling of stationary mode of SHS reaction in nanolayer materials (phenomenological model). 1. Single-stage reaction. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 40–46 [in Russian].
- Kulinich M.V., Bezpalchuk V.M., Kosintsev S.G. et al. (2018) Calculation-experimental investigation of thermal fields in the process of nonstationary soldering. *The Paton Welding J.*, **1**, 14–19.
- Запорожец Т.В., Король Я.Д. (2016) Подход обратной задачи для прогнозирования характеристик самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в многослойных фольгах с учетом конкурентного фазообразования. *Металлофизика и новейшие технологии*, **38(11)**, 1541–1560.  
Zaporozhets, T.V., Korol, Ya.D. (2016) Approach of inverse problem for prediction of characteristics of self-propagating high-temperature synthesis in multilayer foils taking into

- account competitive phase formation. *Metallofiz. Novejshie Tekhnologii*, 38(II), 1541-1560 [in Russian].
13. Уманский Я.С., Финкельштейн Б.Н., Блантер М.Е. и др. (1958) *Физическое металловедение*. Москва, Металлургиздат.
14. Umansky, Ya.S., Finkelshtejn, B.N. et al. (1958) *Physical metals science*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
14. Ustinov A.I., Kuzmenko D.N., Kravchuk M.V., Korol Ya. D. (2015) Initiation of thermal explosion in Ti/Al nanofoils. *International Journal of SHS*, 24(2), 72–77.

## РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ У ПРОЦЕСІ З'ЄДНАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ ПЛАСТИН ЧЕРЕЗ ПРОМІЖНІ ПРОШАРКИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМУ РОЗІГРІВІ ЗОНИ З'ЄДНАННЯ

М.В. Кулініч<sup>1</sup>, Т.В. Запорожець<sup>2</sup>, А.М. Гусак<sup>2</sup>, А.І. Устїнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Черкаський національний університет ім. Богдана Хмельницького. 18000, м. Черкаси, бульвар Шевченка, 18.

У роботі представлені результати чисельного моделювання теплових полів у зоні з'єднання алюмінієвих пластин через проміжні прошарки в процесі локального розігріву зони з'єднання плоским нагрівачем, що контактує з однією із пластин. В якості проміжного прошарку розглянуті шари, які складаються з припою, багатошарової реакційної фольги або шарів обох типів. Розрахунок виконаний з урахуванням теплофізичних характеристик матеріалу пластин, проміжного прошарку і нагрівача, що складається з багатошарових реакційних фольг, в яких реакція самопоширюваного високотемпературного синтезу супроводжується інтенсивним виділенням тепла. Досліджені умови локального нагрівання алюмінієвих пластин, необхідні для отримання нероз'ємних з'єднань у процесі їх паяння або зварювання через проміжний прошарок. Бібліогр. 14, табл. 1, рис. 11.

*Ключові слова:* паяння, зварювання, алюмінієві сплави, припій, багатошарова фольга, теплові поля, локальний розігрів, нероз'ємне з'єднання

## CALCULATION OF THERMAL FIELDS IN PROCESS OF JOINING OF ALUMINUM PLATES THROUGH INTERMEDIATE LAYERS AT LOCAL HEATING OF JOINT ZONE

M.V. Kulinich<sup>1</sup>, T.V. Zaporozhets<sup>2</sup>, A.M. Gusak<sup>2</sup> and A.I. Ustinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv.

E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Bogdan Khmelnytsky National University of Cherkassy, 81 Shevchenko ave., 18000, Cherkassy.

The work presents the results of numerical modelling of thermal fields in zone of joining of aluminum plates through intermediate layers in process of local heating of joining zone by flat heater, contacting with one of the plates. The layers consisting of solder alloy, multilayer reactive foil or layers of both types were considered as an intermediate layer. The calculation was carried out considering thermal-physical characteristics of the plate material, intermediate layer and heater, consisting of the multilayer reaction foils, in which a reaction of self-propagating high-temperature synthesis is accompanied by intensive heat emission. There were studied the conditions of local heating of the aluminum plates necessary for obtaining the permanent joints in the process of their soldering or welding through intermediate layer. 14 Ref., 1 Tabl., 11 Fig.

*Keywords:* soldering, welding, aluminum alloys, solder alloy, multilayer foil, local heating, permanent joint

Поступила в редакцію 06.02.2019



Ассоциация «Электрод» совместно с ИЭС им. Е.О. Патона, ЧАО «ПлазмаТек» и ООО «Светлогорский завод сварочных электродов» проводит научно-практический семинар на тему

**«Сварочные материалы: состояние и перспективы»**

18–20 июня

г. Гомель, Беларусь

**Контакты:** тел. +38 044 200-63-02

E-mail: as\_electrod@mail.ru