

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ПРОЦЕССЕ ПАЙКИ

М. В. КУЛИНИЧ¹, В. Н. БЕЗПАЛЬЧУК², С. Г. КОСИНЦЕВ¹, А. М. ГУСАК²,
Т. В. ЗАПОРОЖЕЦ², А. И. УСТИНОВ¹

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Черкасский национальный университет им. Богдана Хмельницкого. 18031, г. Черкассы, бульв. Шевченко, 81.

В работе теоретическими и экспериментальными методами исследованы температурные поля в условиях пайки металлических пластин, контактирующих с разогретым телом. Для определения тепловых условий, необходимых для обеспечения пайки (расплавления припоя в зоне соединения), был проведен расчет распределения температуры во времени в зоне соединения в зависимости от характеристик системы «нагреватель–пластина–припой–пластина» и теплового сопротивления в контактах между элементами системы. Показано, что путем сравнения теоретически рассчитанных и экспериментально измеренных термограмм можно определить тепловое сопротивление в зонах контакта. На основе полученных значений теплового сопротивления в контактах проведено моделирование тепловых полей в системах произвольными размерами элементов. Библиогр. 13, рис. 7.

Ключевые слова: тепловые поля, нестационарный процесс, метод конечных разностей, реакционная пайка, неразъемное соединение, многослойная фольга, локальный разогрев

Пайка широко используется для получения неразъемных соединений деталей [1, 2]. Этот процесс проводится путем нагревания соединяемых деталей в печи до температуры плавления припоя (стационарные условия) или локального разогрева зоны соединения с помощью, например, контакта с разогретым ранее телом или при воздействии на нее источника концентрированного теплового излучения (инфракрасного [3], лазерного [4] и др.) [5]. В условиях локального разогрева зоны соединения до температуры плавления припоя распределение температурных полей в зоне соединения будет носить нестационарный характер, поскольку разогрев будет сопровождаться отводом тепла на холодные участки соединяемых деталей. При отсутствии ограничений мощности концентрированных источников тепла реализация этого процесса пайки не будет вызывать трудностей даже в условиях проведения ремонтных работ на поверхности деталей большого размера, например, при наложении заплат на оболочку из материала с высокой теплопроводностью (алюминиевые сплавы).

В отсутствии концентрированных источников тепловой энергии и большой площади соединения для его разогрева могут быть использованы нагреватели, в которых генерирование тепловой энергии происходит в результате инициирования в них экзотермической реакции. В качестве таких нагревателей могут быть использованы порошковые смеси, компоненты которых реагируют с выделением тепла. Известно, что интенсивность про-

текания экзотермических реакций существенно возрастает при переходе от порошковых смесей к компактным материалам с композиционной структурой на их основе. Так, в работах [6, 7] было показано, что в качестве таких композиционных материалов могут быть использованы многослойные фольги, состоящие из слоев на основе интерметаллидообразующих элементов, таких, например, как Ni и Al или Ti и Al, полученные вакуумным послойным осаждением [8]. При инициировании в таких системах реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) интенсивность тепловыделения достигает величины порядка 5...6 кВт/см² [9], что может обеспечить локальный разогрев зоны соединения в условиях интенсивного теплоотвода.

Схематически такой процесс пайки пластин одинакового размера можно представить, как показано на рис. 1 (лабораторная система). Для такой системы характеристики нагревателя, необходимые для обеспечения процесса пайки, можно определить экспериментально, изменяя массу реакционного материала. Однако если такой подход к определению характеристик нагревателя применим для пластин одинакового размера, то в случае, например, присоединения пластины малого (конечного) размера к пластине большого (неограниченного) размера будет вызывать затруднение. Главным образом это связано с необходимостью учета отвода тепла от зоны соединения в пластину большого размера при использовании результатов,

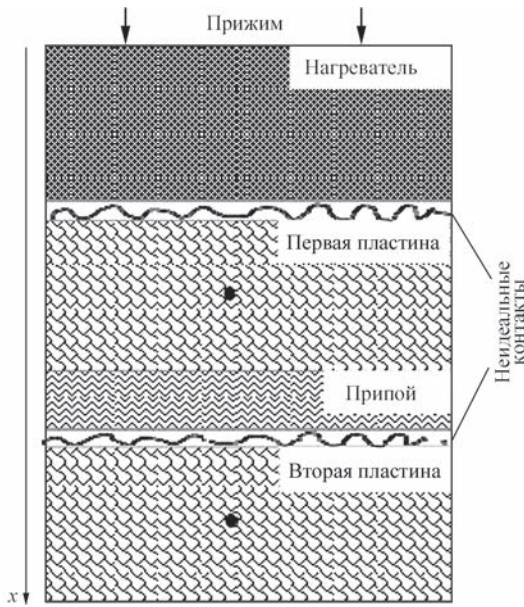


Рис. 1. Схема получения неразъемного соединения пластин одинакового размера (лабораторная система) методом пайки с помощью локального разогрева зоны соединения от внешнего нагревателя

полученных на образцах конечного размера. Ясно, что для компенсации этого отвода тепла параметры нагревателя необходимо увеличить. Однако, учитывая, что пластины изготовлены из алюминиевых сплавов, увеличение массы нагревателя может привести к их значительному перегреву. Вследствие этого механические свойства пластин будут деградировать. С этой точки зрения выбор характеристик нагревателя является ключевым при изменении размеров соединяемых элементов системы. Определение оптимальных характеристик нагревателя, необходимых для обеспечения реакционной пайки пластин произвольного размера в условиях локального разогрева зоны соединения, можно было бы выполнить на основе расчета тепловых полей.

Вместе с тем сложность реализации этого подхода обусловлена тем, что тепловые процессы в зоне соединения зависят от многих параметров, одни из которых известны (например, теплопроводность соединяемых материалов) или представляют собой геометрические и массовые характеристики элементов системы, другие же имеют неопределенное значение, как, например, вели-

чина теплового сопротивления на границе контакта элементов системы. Для устранения этой неоднозначности в выборе параметров для моделирования тепловых полей в реальных системах в работе предложен метод расчета коэффициентов теплового сопротивления контактов, основанный на проведении сравнения экспериментально измеренного и рассчитанного изменения температуры в системе конечного размера (лабораторная система). Путем варьирования параметров, характеризующих тепловое сопротивление на границах раздела элементов, получено удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных данных, что позволяет провести моделирование тепловых полей в нестационарных условиях пайки пластины ограниченного размера на поверхность детали неограниченного размера.

Экспериментальные и расчетные методы.

Для описания нестационарного процесса распространения тепла в трехмерном образце запишем уравнение теплопроводности в следующем виде:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\kappa \text{grad}T), \quad (1)$$

где c — теплоемкость материала; ρ — плотность; κ — коэффициент теплопроводности.

Учитывая, что система состоит из различных материалов, которые имеют различный характер теплового обмена между отдельными областями, удобно разбить ее на конечные элементы. В работе для решения этого уравнения использован метод конечных разностей [10, 11], который позволяет определять значение температуры в конечном элементе через значения температур в соседних и характеристики теплопроводности материала:

$$T_{i,j,k}^{new} = T_{i,j,k} + a_k^2 \left(\frac{T_{i-1,j,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i+1,j,k}}{dx^2} + \frac{T_{i,j-1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j+1,k}}{dy^2} + \frac{T_{i,j,k-1} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j,k+1}}{dz^2} \right) dt, \quad (2)$$

где $a_k^2 = k / (c\rho)$ — коэффициент температуропроводности; $T_{i,j,k}$ — температура конечного элемента в точке $x_{i,j,k}$.

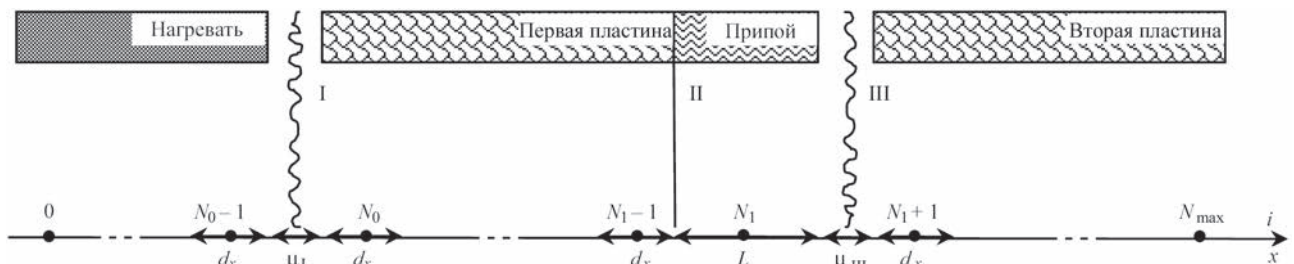


Рис. 2. Схема разбиения системы, состоящей из нагревателя, первой пластины, припоя и второй пластины, на ячейки конечного размера (схема соответствует одномерному приближению)

Данная конечно-разностная схема (2) может быть применена для всех непограничных областей системы. У граничных элементов соседние точки будут характеризоваться существенно отличными теплопроводностями или же геометрическими/массовыми параметрами. Поэтому для пограничных областей более удобно записывать плотность теплового потока в виде разности температур вместо температурных градиентов, используя при этом некоторый «коэффициент переноса тепла» μ вместо теплопроводности κ . Например, $J = -\mu_{i,i+1} \Delta T$ для ячеек i и $(i + 1)$ с коэффициентами теплопроводности κ_i, κ_{i+1} и размерами ячеек h_i, h_{i+1} .

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

Тогда для ячеек, у которых есть соседние ячейки с иными коэффициентами теплопроводности или размерами, уравнение (2) изменяется. В одномерном случае оно записывается в виде

$$T_i^{new} = T_i + \frac{1}{c_i \rho_i h_i} (-\mu_{i-1,i} (T_i - T_{i-1}) + \mu_{i,i+1} (T_{i+1} - T_i)) dt. \quad (4)$$

На рис. 2 показаны три контактные зоны, для которых применяется уравнение (4):

I — между нагревателем и первой пластиной (неидеальный контакт);

II — между первой пластиной и припоем (идеальный контакт, образованный путем осаждения припоя в вакууме);

III — между припоем и второй пластиной (неидеальный контакт).

Напомним, что неидеальность контакта I означает рост теплового сопротивления и снижение теплового потока между нагревателем (ячейка $N_0 - 1$) и первой пластиной (N_0). Контакт I описываем коэффициентом теплопереноса μ_I , который в общем случае является неопределенной величиной. Неидеальность контакта III подразумевает тепловое сопротивление между припоем (ячейка N_I) и второй пластиной ($N_I + 1$) (рис. 2) и описывается коэффициентом теплопереноса μ_{III} , который также является неопределенным параметром системы. Поскольку, как упоминалось, контакт II является идеальным, для него коэффициент теплопереноса определяется исходя из уравнения (3):

$$\mu_{N_I-1, N_I} = 2\kappa_{plate1} \kappa_{solder} / (\kappa_{plate1} L + \kappa_{solder} dx).$$

Изменение температуры слева и справа от контакта I описывается уравнениями:

$$T_{N_0-1, j, k}^{new} = T_{N_0-1, j, k} + \left(-\frac{a_{heater}^2}{dx^2} (T_{N_0-1, j, k} - T_{N_0-2, j, k}) + \frac{\mu_I a_{heater}^2}{\kappa_{heater} dx} (T_{N_0, j, k} - T_{N_0-1, j, k}) \right) dt,$$

$$T_{N_0, j, k}^{new} = T_{N_0, j, k} + \left(-\frac{\mu_I a_{plate1}^2}{\kappa_{plate1} dx} (T_{N_0, j, k} - T_{N_0-1, j, k}) + \frac{a_{plate1}^2}{dx^2} (T_{N_0+1, j, k} - T_{N_0, j, k}) \right) dt. \quad (5)$$

Контакты II и III относятся к припою, который пребывает в твердом состоянии при низких температурах $T < T_{out}$, жидком при $T > T_{out}$ и сохраняет постоянную температуру T_{out} при возрастающей доле жидкой фазы η в процессе плавления. Поэтому удобно ввести временные переменные T_{XL}, T_{XR} для левой и правой границы припоя. Используя условие непрерывности тепловых потоков на этих границах, можно найти, что:

$$T_{XL} = \frac{(\kappa_{solder} dx T_{N_I, k} + L \kappa_{plate1} T_{N_I-1, j, k})}{L \kappa_{plate1} + \kappa_{solder} dx}, \quad (6)$$

$$T_{XR} = \frac{(L \mu_{III} T_{N_I+1, j, k} + 2 \kappa_{solder} T_{N_I, j, k})}{2 \kappa_{solder} + L \mu_{III}}.$$

Тогда тепловые потоки к припою и из него:

$$J_{in} = -2 \kappa_{plate1} \kappa_{solder} \frac{(T_{N_I, j, k} - T_{N_I-1, j, k})}{L \kappa_{plate1} + \kappa_{solder} dx}, \quad (7)$$

$$J_{out} = -\frac{\mu_{III} \frac{2 \kappa_{solder}}{L}}{\mu_{III} + \frac{2 \kappa_{solder}}{L}} (T_{N_I+1, j, k} - T_{N_I, j, k}),$$

где J_{in}, J_{out} — входящий и исходящий тепловые потоки для ячейки припоя (его мы описываем лишь одной ячейкой, которая при низких температурах соответствует твердому состоянию, при высоких — жидкому, а в промежуточный период — двухфазной системе твердое тело–жидкость с температурой эвтектики).

Когда температура припоя ниже температуры эвтектики (твердый припой) или выше (жидкий), она определяется по уравнению

$$T_{N_I, j, k}^{new} = T_{N_I, j, k} + (J_{in} - J_{out}) dt / c_{solder} \rho_{solder} dx. \quad (8)$$

Тогда поток тепла в припой, так и из него будет описываться следующим образом:

$$\eta^{new} = \eta + (J_{in} - J_{out}) dt / \lambda L \rho_{solder}, \quad (9)$$

где L, λ, ρ — толщина слоя припоя, удельная теплота плавления и плотность, соответственно.

Коэффициент теплопроводности припоя κ_{solder} изменяется как $\kappa_{solder} = \kappa_{solder}^{liquid} \eta + \kappa_{solder}^{solid} (1 - \eta)$, в соответствии с изменением содержания жидкой и твердой фазы. Более того, мы предполагаем, что после полного плавления припоя тепловое сопротивление между ним и второй пластиной значительно уменьшается (т. е. коэффициент теплопереноса μ_{III}^{new} возрастает), поскольку возрастает

площадь поверхности соприкосновения жидкого припоя с поверхностью второй пластины. Учитывая это, изменение коэффициента μ_{III} после начала плавления припоя можно представить в виде

$$\mu_{III}^{new} = \kappa_{plate2} \left(\mu_{solid} (1 - \eta) + \eta \frac{2\kappa_{solder}^{liquid}}{L} \right) / \left(\kappa_{plate2} + \frac{\eta \kappa_{solder}^{liquid} dx}{L} \right), \quad (10)$$

где μ_{solid} — коэффициент теплопереноса между твердой фазой припоя и второй пластиной. В предельном случае $\eta = 0$ уравнение (10) сводится к $\mu_{III}^{new} = \mu_{solid}$. В другом предельном случае оно упрощается в

$$\mu_{III}^{new} = \frac{2\kappa_{plate2} \kappa_{solder}^{liquid}}{L\kappa_{plate2} + \kappa_{solder}^{liquid} dx},$$

т. е. совпадает с общим уравнением (3). Как следствие, уравнение (3) может быть написано для конечных пограничных ячеек системы, если принимать во внимание, что существование неидеальных контактов между разными элементами ведет к появлению теплового сопротивления, а при некоторой температуре происходит плавление припоя. Более подробно этот подход описан в работе [12]. Его использование позволяет рассчитывать температурное распределение в каждый момент времени в зависимости от параметров системы и проследить таким образом изменение температуры в заданной точке системы.

Для проверки этого подхода к описанию тепловых полей при нестационарном режиме пайки необходимо сравнить рассчитанные значения температуры с экспериментально измеренными. С этой целью исследована система, состоящая из нагревателя и двух пластин из сплава АМг6 толщиной 5 мм и размером 50×50 мм, разделенных слоем (100 мкм) припоя (эвтектический сплав Al-Si), осажденного на первую пластину. В ка-

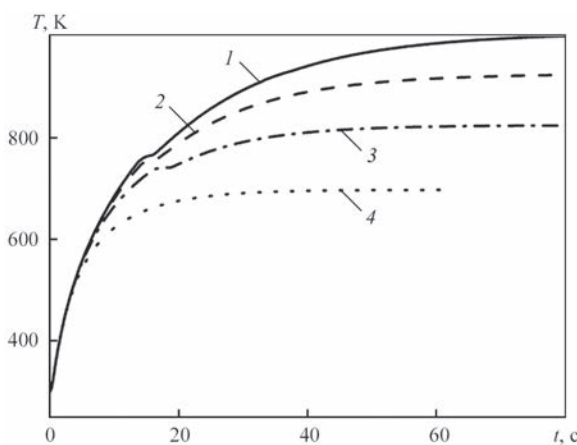


Рис. 3. Влияние толщины нагревателя на кинетику изменения температуры в центре первой пластины: 1 — $d_n = 5$ мм; 2 — 4; 3 — 3; 4 — 2

честве нагревателя использовали многослойную фольгу Al/Ni, которую размещали над первой пластиной и прижимали ее с заданным усилием (порядка 1000 Н). Затем с помощью импульса тока в нанофольге инициировали СВС реакцию, сопровождающуюся интенсивным выделением тепла. В результате перераспределения тепла от нагревателя к пластинам система разогревалась до заданной температуры. Для измерения температуры использовали две тонкие термопары, заведенные в центры пластин (рис. 1). Термопары были подключены к компьютеру через АЦП с частотой опроса 1 кГц. Полученные данные использовали для определения параметров модели.

Результаты и обсуждение. Для определения условий плавления припоя были выполнены расчеты тепловых полей системы, основываясь на характеристиках использованных материалов и их толщинах, при вариации толщины нагревателя d_n . На рис. 3. представлены расчетные изменения температуры в первой пластине, полученные с учетом предположения, что скорость СВС реакции в нагревателе существенно больше скорости распространения тепла. Это предположение основывается на том, что при скорости распространения фронта СВС реакции 100 см/с время «сгорания» фольги толщиной 5 см составит 0,05 с [13]. В этом случае при описании характеристики нагревателя исходили из его геометрических размеров и температуры, которой он достигает в результате СВС реакции. Временем его разогрева до максимальной температуры пренебрегали. Видно, что с увеличением толщины нагревателя максимальная температура разогрева первой пластины, да и всей системы в целом (расчеты проводились в адиабатических условиях), возраста-

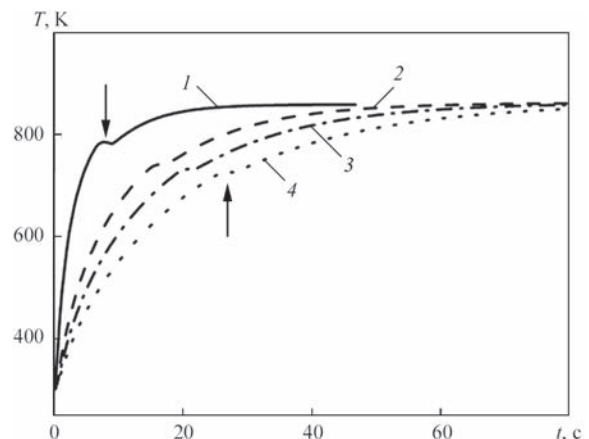


Рис. 4. Зависимость температуры первой пластины от времени при различных характеристиках теплового сопротивления на границе раздела нагреватель — первая пластина: 1 — $\mu_0 = 5 \cdot 10^4$ Вт/(м²·К); 2 — $1 \cdot 10^4$; 3 — $7 \cdot 10^3$; 4 — $5 \cdot 10^3$. Характеристики теплопроводности контакта припоя и второй пластины постоянны (стрелками указаны особенности изменения температуры, обусловленные плавлением припоя (его окончанием))

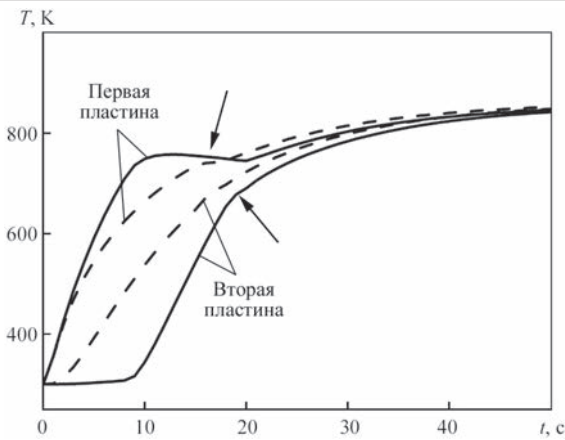


Рис. 5. Зависимость температуры в середине пластин от времени при различных характеристиках теплового сопротивления на границе раздела припой — вторая пластина: $\mu_1 = 5 \cdot 10^2$ (сплошная линия); $5 \cdot 10^4$ Вт/(м²·К) (штриховая). Характеристики теплопроводности контакта нагревателя и первой пластины постоянны (обозначение стрелок то же, что и на рис. 4)

ет. Если температура плавления припоя задана, то путем увеличения толщины нагревателя d_n систему можно разогреть до необходимого уровня. Например, нагреватель толщиной 3 мм обеспечивает расплавление припоя с температурой плавления 700 К (рис. 3), что влияет на зависимость температуры в центре первой пластины от времени контакта с нагревателем (расчетные данные) в виде «полочки». Отметим, что температура «полочки» несколько выше, чем температура плавления припоя, причем эта разность возрастает при увеличении толщины нагревателя (его теплотворной способности) как следствие температурного градиента, присутствующего в первой пластине, который увеличивается пропорционально скорости нагревания.

Можно предположить, что скорость нагрева первой пластины будет в значительной степени зависеть от теплового сопротивления контак-

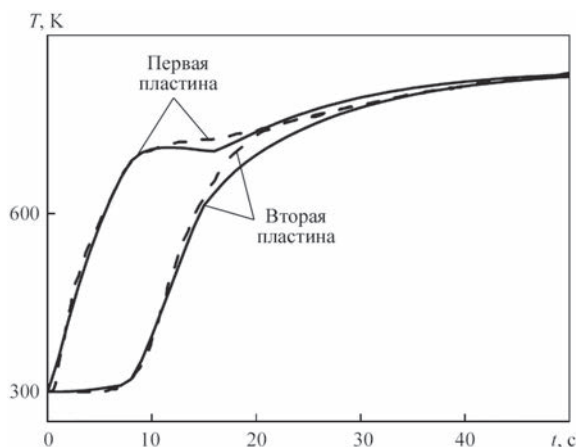


Рис. 6. Экспериментально измеренное (штриховая линия) и расчетная (сплошная) температура в середине первой и второй пластин в процессе пайки при локальном их разогреве с помощью нагревателя, контактирующего с первой пластиной

та между нагревателем и первой пластиной. На рис. 4 представлены рассчитанные данные при одинаковой толщине нагревателя (3 мм), но с различной величиной теплового сопротивления в контакте между нагревателем и первой пластиной. Видно, что при изменении величины теплового сопротивления скорость нагрева существенно изменяется, что отображается на времени плавления припоя: при увеличении теплового сопротивления на порядок время до полного расплавления припоя увеличивается с 5 до 30 с.

Поскольку температура припоя и степень его расплавления являются результатом теплового баланса между тепловым потоком из нагревателя в первую пластину и тепловым потоком из припоя во вторую пластину, можно предположить, что тепловое сопротивление на границе раздела между припоем и второй пластиной будет также оказывать влияние на изменения температуры припоя. Действительно, как видно из рис. 5, увеличение теплопроводности в зоне контакта между припоем и второй пластиной приводит к замедлению нагрева первой пластины, а следовательно, и припоя. Однако, несмотря на то, что при уменьшении теплопроводности на границе между припоем и второй пластиной плавление припоя начинается раньше, время до его завершения увеличивается. Из зависимости температуры от времени в середине второй пластины (рис. 5) видно, что плавление припоя завершается, когда ее температура достигает температуры плавления припоя.

Если исходить из того, что процесс пайки происходит при условии полного расплавления припоя, результаты расчетов указывают на то, что величина теплопроводности контакта между припоем и второй пластиной не оказывает существенного влияния на время завершения этого процесса.

На рис. 6 представлены расчетные и экспериментальные данные в описанной выше системе, измеренные с помощью термопар, закрепленных в середине первой и второй пластин. Видно, что температура первой пластины, контактирующей с нагревателем, резко увеличивается с момента начала СВС реакции в нагревателе. Однако через 8...9 с скорость нагрева первой пластины резко меняется. За это время температура первой пластины и прикрепленного к ней припоя достигает температуры плавления припоя (порядка 700 К). На этом основании можно предположить, что замедление роста температуры в первой пластине обусловлено плавлением припоя.

В пользу этого свидетельствует и точка начала увеличения температуры во второй пластине. Такая задержка во времени разогрева второй пластины может быть объяснена большим тепловым сопротивлением в контакте между припоем и вто-



Рис. 7. Распределение температуры в поперечном сечении системы (показано 1/4 ее часть) при ее локальном разогреве в момент плавления припоя. Длина и ширина второй пластины в 3 раза превышают длину и ширину первой пластины

рой пластиной. После плавления припоя тепловой контакт между ним и второй пластиной улучшается, что и способствует перераспределению тепла от припоя ко второй пластине и ее разогреву до уровня температуры первой пластины.

Путем варьирования параметров теплового сопротивления в контактах было рассчитано изменение температуры в системе в процессе ее разогрева, качественно подобное наблюдаемому экспериментально (рис. 6). При этом предполагалось, что в момент плавления припоя тепловое сопротивление на границе раздела между припоем и второй пластиной исчезает.

На этом основании мы предположили, что рассчитанные параметры теплового сопротивления в контактах при данных условиях проведения процесса пайки можно использовать для расчета температурных полей в случае, когда первая пластина присоединяется ко второй пластине, размеры которой значительно больше, т. е. на трехмерный случай.

На рис. 7 представлено распределение температуры в поперечном сечении системы, состоящей из нагревателя, первой пластины с нанесенным припоем и второй пластины большого размера в момент, когда температура припоя достигает температуры его плавления (необходимое условие для пайки). Видно, что в результате теплообмена между элементами системы тепло распространяется от нагревателя к первой пластине, а затем, через припой, ко второй пластине. В отличие от лабораторной сборки в этом случае тепло распространяется по второй пластине за пределы размеров первой пластины. Однако, как видно из рис. 7, это «растекание» тепла по объему второй пластины не критично с точки зрения достижения температурных условий для пайки в контакте между первой и второй пластинами. Расчеты показали, что для компенсации этих потерь тепла в случае соединения пластин равной толщины достаточно лишь на 10...20 % увеличить толщину нагревателя.

Выводы

1. Расчет тепловых полей при пайке в нестационарных условиях нагрева с помощью локального источника тепла ограниченной энергоемкости показал, что существует принципиальная возможность достичь расплавления припоя, находящегося в виде тонкой прослойки между двумя пластинами с высокой теплопроводностью.

2. Показано, что в адиабатических условиях пайки время, необходимое для расплавления припоя между пластинами, существенно зависит от параметров теплового контакта между нагревателем и первой пластиной, но почти не зависит от параметров теплового контакта между припоем и второй пластиной.

3. На основе экспериментально измеренных термограмм для лабораторной системы, состоящей из элементов с одинаковыми площадями контактов, путем самосогласованного расчета, включающего вариацию параметров, характеризующих тепловое сопротивление в контактах, можно определить их значение.

4. Полученные параметры теплового сопротивления могут быть использованы в моделировании тепловых полей в системах при пайке деталей с произвольными размерами. Показано, что для достижения расплавления припоя при переходе от лабораторной к «реальной» системе с «бесконечной» второй пластиной энергоемкость, а значит и толщину, нагревателя необходимо увеличить на 10...20 %.

Список литературы

- Merzhanov A. G., Borovinskaya I. P. (1972) Self-propagating high-temperature synthesis of refractory inorganic compounds. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, **204**, 366–369.
- Sytshev A. E., Vadchenko S. G., Boyarchenko O. D. et al. (2013) SHS welding by thermal explosion: Ti–Ti and Ti–NiAl joints. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, **22**(2), 99–102.
- Ren-Kae Shiue, Chen Chia-Pin, Wu Shyi-Kaan. (2015) Infrared Brazing of Ti50Ni50 Shape Memory Alloy and 316L Stainless Steel with Two Silver-Based Fillers. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **46**(6), 2364–2371.
- Nothdurft S., Springer A., Kaierle S. et al. (2016) StonisLaser soldering and brazing of steel-aluminum sheets for tailored hybrid tubes. *Journal of Laser Applications*, **28**, 2, <https://doi.org/10.2351/1.4943996>.
- Jacobson David M., Humpston Giles. (2005) *Principles of Brazing*. USA. Printed in the United States of America.
- Morsi K. (2001) Review: reaction synthesis processing of Ni–Al intermetallic materials. *Materials Science and Engineering: A*, **299**, 1–5.
- 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*, **40**, 160–243.
- Ustinov A. I., Olikhovska L. O., Melnichenko T. V., Shyshkin A. E. (2008) Effect of overall composition on thermally induced solid-state transformations in thick EB PVD Al/Ni multilayers. *Sur. and Coat. Tech.*, **202**, 3832–3838.
- Кравчук М. В., Устинов А. И. (2015) Влияние термодинамических и структурных параметров многослойных фольг на характеристики реакции СВС. *Автоматическая сварка*, **8**, 10–15.

10. Фарлоу С. (1985) *Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров*. Пер. с англ. Москва, Мир.
11. Тихонов А. Н., Самарский А. А. (1977) *Уравнения математической физики*. Москва, Наука.
12. Безпальчук В. М., Запорожець Т. В., Кравчук М. В. та ін. (2015) Розрахунок теплових полів у багатофазній тривимірній системі при нестационарних умовах її нагрівання. *Вісник ЧНУ*, 349, **16**, 38–49.
13. Zaporozhets T. V., Gusak A. M., Ustinov A. I. (2010) SHS reactions in nanosized multilayers – analytic model versus numeric model. *Intern. J. of Self Propagating High Temperature Synthesis*, 19(4), 227–236.

References

1. Merzhanov, A.G., Borovinskaya, I.P. (1972) Self-propagating high-temperature synthesis of refractory inorganic compounds. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **204**, 366-369.
2. Sytschev, A.E., Vadchenko, S.G., Boyarchenko, O.D. et al. (2013) SHS welding by thermal explosion: Ti-Ti and Ti-NiAl Joints. *Int. J. of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 22(2), 99-102.
3. Ren-Kae Shiue, Chen Chia-Pin, Wu Shyi-Kaan (2015) Infrared brazing of Ti50Ni50 shape memory alloy and 316L stainless steel with two silver-based fillers. *Metallurg. and Mater. Transact. A*, 46(6), 2364-2371.
4. Nothdurft, S., Springer, A., Kaieler, S. et al. (2016) StonisLaser soldering and brazing of steel-aluminum sheets for tailored hybrid tubes. *J. of Laser Applications*, 28, 2, <https://doi.org/10.2351/1.4943996>.
5. Jacobson, D.M., Humpston, G. (2005) *Principles of brazing. USA*.
6. Morsi, K. (2001) Review: Reaction synthesis processing of Ni-Al intermetallic materials. *Mater. Sci. & Engin.: A*, 299(1-2), 1-5.
7. Weihs, 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*, **40**, 160-243.
8. Ustinov, A.I., Olikhovska, L.O., Melnichenko, T.V., Shyshkin, A.E. (2008) Effect of overall composition on thermally induced solid-state transformations in thick EB PVD Al/Ni multilayers. *Sur. and Coat. Tech.*, **202**, 3832-3838.
9. Kravchuk, 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.
10. Farlow, S. (1985) *Partial differential equations for scientists and engineers*. Moscow, Mir [in Russian].
11. Tikhonov, A.N., Samarsky, A.A. (1977) *Equations of mathematical physics*. Moscow, Nauka [in Russian].
12. Bezpachuk, V.M., Zaporozhets, T.V., Kravchuk, M.V. et al. (2015) Calculation of thermal fields in multiphase 3D system under nonstationary conditions of its heating. *Visnyk ChNU*, 349(16), 38-49 [in Ukrainian].
13. Zaporozhets, T.V., Gusak, A.M., Ustinov, A.I. (2010) SHS reactions in nanosized multilayers – analytic model versus numeric model. *Intern. J. of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 19(4), 227-236.

М. В. Кулініч¹, В. М. Безпальчук², С. Г. Косінцев¹,
А. М. Гусак², Т. В. Запорожець², А. І. Устінів¹

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

²Черкаський національний університет
ім. Богдана Хмельницького.
м. Черкаси, бульв. Шевченка, 81.

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ ПРОЦЕСІ ПАЯННЯ

В роботі теоретичними та експериментальними методами досліджено температурні поля в умовах паяння металевих пластин, що контактують з розігрітим тілом. Для визначення теплових умов, що необхідні для забезпечення процесу паяння (розплавлення припою в зоні з'єднання), було проведено розрахунок розподілу температури з часом в зоні з'єднання в залежності від характеристик системи «нагрівач–пластина–припій–пластина» і теплового опору в контактах між елементами системи. Показано, що шляхом порівняння теоретично розрахованих і експериментально вимірених термограм можна визначити тепловий опір в зонах контакту. На основі отриманих значень теплового опору в контактах проведено моделювання теплових полів в системах з довільними розмірами елементів. Бібліогр. 13, рис. 7.

Ключові слова: теплові поля, нестационарний процес, метод кінцевих різниць, реакційне паяння, нероз'ємне з'єднання, багатошарова фольга, локальний розігрів

M.V. Kulinich¹, V.N. Bezpachuk², S.G. Kosintsev¹,
A.M. Gusak², T.V. Zaporozhets², A.I. Ustinov¹

¹E.O.Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

²Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkassy.
81 Shevchenko boulevard, 18031, Cherkassy, Ukraine

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMAL FIELDS IN THE PROCESS OF NON-STATIONARY BRAZING

In the work theoretical and experimental methods were used to investigate temperature fields in the conditions of brazing the metal plates, contacting with a heated body. To determine thermal conditions, necessary to provide brazing (melting of brazing alloy in the joint zone), calculation of temperature distribution over time in the joint zone was carried out, depending on characteristics of «heater-plate-brazing alloy-plate» system and thermal resistance in contacts between the system elements. It is shown that by comparing the theoretically calculated and experimentally measured thermograms, it is possible to determine thermal resistance in the contact zones. On the basis of the obtained values of thermal resistance in the contacts, the modeling of thermal fields in the systems with the arbitrary sizes of elements was carried out. 13 Ref., 7 Fig.

Keywords: thermal fields, non-stationary process, method of finite differences, reaction brazing, permanent joint, multilayer foil, local heating

Поступила в редакцію 27.11.2017