

Анализ процесса сварки-пайки методом взрыва трубных досок теплообменных аппаратов*

Ю. С. Воробьев^а, М. В. Чернобрылко^а, А. В. Колодяжный^а, Л. Крушка^б

^а Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, Украина

^б Военно-техническая академия, Варшава, Польша

Рассматривается процесс кинематической сварки-пайки тонкостенных трубных досок и трубных элементов при создании теплообменных аппаратов. Процесс моделируется высокоскоростным контактным взаимодействием коаксиальных цилиндров, между которыми расположен тонкий слой высокопрочного аморфного припоя. Внутренний цилиндр расширяется под действием импульсной нагрузки взрывного типа. При решении задачи термоупругопластичности учитываются динамические свойства материала. Процесс реализован на экспериментальных образцах.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, трубная доска, сварка-пайка методом взрыва, высокоскоростное соударение.

Введение. В промышленности широко используются теплообменные аппараты (ТА), включая состоящие из пучка параллельных трубок, концы которых закреплены в трубных досках. Известно много способов крепления и герметизации трубок в трубной доске. Условия крепления трубок ТА требуют обеспечения достаточной прочности при их температурном удлинении и поперечных вибрациях. Герметичность соединения должна гарантировать отсутствие или малое влияние щелевой коррозии. При этом следует учитывать ремонтпригодность или заменяемость полученного соединения.

В настоящей работе рассматривается процесс создания ТА с увеличенной прочностью и плотностью шва в зоне крепления трубок в тонкостенные трубные доски (ТТД) с цилиндрическими патрубками путем пайки или сварки-пайки методом взрыва с использованием высокопрочных аморфных припоев никелевой группы. Заряд взрывчатого вещества укладывается на внутреннюю поверхность одного цилиндрического элемента, который при взрыве начинает расширяться со скоростью 300...1000 м/с и соударяется с внешним неподвижным цилиндрическим элементом. Между элементами расположен тонкий слой припоя. В области контакта реализуются высокие уровни давления, температуры, деформации и ее скорости. При определенных значениях этих параметров происходит разогрев поверхностей и припоя, а также их соединение. Определение рациональных значений параметров требует решения задачи о высокоскоростном взаимодействии соединяемых элементов конструкций и высокопрочного аморфного припоя между ними при взрывном нагружении. При решении задачи учитываются динамические свойства материала в виде зависимостей интенсивности динамических напряжений от интенсивностей деформации и ее скорости. Эти зависимости представляют математическую аппроксимацию экспериментальных данных [1].

* Доклад на IV Международном симпозиуме “Прочность и разрушение материалов и элементов конструкций при импульсном нагружении” (IMPULSE-2001).

Результаты математического моделирования используются при определении рациональных параметров технологического процесса сварки-пайки методом взрыва и проверяются экспериментально.

Математическая модель процесса сварки-пайки. Моделируется процесс высокоскоростного термоупругопластического соударения двух цилиндров, имеющих постоянную толщину и конечную длину с полным контактом по боковой поверхности. Цилиндры расположены эквидистантно. На внешнюю поверхность внутреннего цилиндра нанесен слой припоя. Схема расположения элементов представлена на рис. 1. Модель учитывает нормальное соударение цилиндров с учетом деформационного разогрева при пластическом деформировании. Внутренний цилиндр под действием детонации определенных взрывчатых веществ подвергается воздействию нестационарной осесимметричной импульсной нагрузки. В результате нагружения происходит его перемещение и соударение с внешним цилиндром. При этом для реализации пайки необходимо рассмотреть вопрос о релаксации тепла в зоне шва и решить задачу нестационарной теплопроводности. Если температура в зоне контакта цилиндров достигает температуры плавления припоя, то происходит процесс пайки.

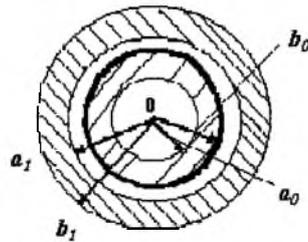


Рис. 1. Взаимное расположение цилиндров и слоя припоя в начальный момент времени.

Цилиндры считаем достаточно длинными и однородными. Внутренний цилиндр деформируется под действием внезапно приложенного внутреннего давления P :

$$P = 2P_m e^{-t/\theta}, \quad (1)$$

где P_m – абсолютная величина максимального давления; θ – показатель затухания давления; t – время.

При взаимодействии слоев в результате пластической деформации выделяется тепловая энергия. На рис. 1 изображена схема расположения коаксиальных цилиндров до начала процесса деформирования.

Задача рассматривается в цилиндрической системе координат и решается на основе уравнений динамической термоупругопластичности [2]:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} + (3\lambda + 2\mu)\alpha_T \frac{\partial T}{\partial r} = \rho \left(\frac{\partial \dot{u}_r}{\partial t} + \dot{u}_r \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial r} \right);$$

$$\frac{\partial^2 T(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_T} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t}, \quad (2)$$

где r, φ – цилиндрические координаты; \dot{u}_r – скорость перемещения; T – температура; α_T – коэффициент температуропроводности материала; λ, μ – упругие постоянные Ламе; σ_r, σ_φ – компоненты напряжений,

$$\begin{aligned}\sigma_r &= f_1(u_r, \dot{u}_r, \dots, \alpha_T, T); \\ \sigma_\varphi &= f_2(u_r, \dot{u}_r, \dots, \alpha_T, T).\end{aligned}$$

Условия на поверхности внутреннего цилиндра следующие:

$$\sigma_r|_{r=a_0} = 2P_m \exp(-t/\theta), \quad \sigma_r|_{r=b_0} = 0. \quad (3)$$

Начальные условия таковы:

$$\sigma_r|_{t=0} = 0. \quad (4)$$

Распределение амплитуды скоростей в зоне контакта внутреннего и внешнего цилиндров определялось из соображений их нормального соударения на основе уравнений (2), но при других граничных условиях. Нагружение внешнего цилиндра моделируется скоростью на его поверхности.

При сварке взрывом в области контакта соударяющихся цилиндров реализуются высокие скорости деформации материала. Поэтому в расчетах необходимо учитывать динамические свойства материала [3]:

$$\sigma_i = E\varepsilon_i [1 - \omega(\dot{\varepsilon})], \quad (5)$$

где $\omega(\dot{\varepsilon}) = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{1/n}$ – безразмерная функция упрочнения; параметры n и D определяются экспериментально [1, 3, 4].

Применение численных методов с использованием моделей материалов, соответствующих их реальному поведению при высоких скоростях деформации, позволяет расширить представление об особенностях деформирования цилиндрических конструкций при сварке-пайке взрывом.

В процессе деформации должны соблюдаться условия динамической прочности соединяемых элементов, что достигается подбором соответствующих зарядов.

Качество пайки определяется температурным режимом. На основе уравнения

$$\frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} - \frac{1}{\alpha_T} \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

исследуются температурные поля, возникающие в процессе соударения, при различных режимах нагружения, которые описываются уравнениями (2) с учетом условий контакта элементов и зависимости (5).

Граничные условия для уравнения (6) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(a_0, t)}{\partial r} - \alpha_T (T(a_0, t) - T(r, t_{cm})) &= 0; \\ \frac{\partial T(b_0, t)}{\partial r} + \alpha_T (T(b_0, t) - T(r, t_{cm})) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Начальные условия:

$$T(r, 0) = T(r, t_{cm}). \quad (8)$$

Решение уравнения нестационарной теплопроводности (6) с граничными (7) и начальными (8) условиями удобно провести с использованием интегрального преобразования Лапласа по переменной t . Температурное поле цилиндра запишем в окончательном виде:

$$T(r, t) = T(r, t_{cm}) - 2(T(r, t_{cm}) - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} D_n u_0(\beta_n r) e^{-\beta_n^2 t}, \quad (9)$$

где

$$D_n = \frac{\alpha_T u_0(\beta_n) + r \alpha_T u_0(\beta_n r)}{(\alpha_T^2 - \beta_n^2) u_0^2(\beta_n) - r^2 (\alpha_T^2 - \beta_n^2) u_0^2(\beta_n r)};$$

$$u_0(\beta r) = Y_1(\beta r) J_0(\beta r) - J_1(\beta r) Y_0(\beta r) = -\frac{2}{\pi \beta r};$$

$$u_0(\beta) = \frac{J_0(\beta r) + \frac{\alpha_T}{\beta} J_0(\beta r)}{J_1(\beta) - \frac{\alpha_T}{\beta} J_0(\beta r)} \frac{2}{\pi \beta};$$

β_n – корни уравнения $\frac{\beta J_1(\beta)}{J_0(\beta)} = \alpha_T$.

Условием пайки является достижение температуры плавления припоя.

Численные примеры. В качестве примера рассматривался цилиндр с внутренним радиусом $a_0 = 0,027$ м, наружным $b_0 = 0,032$ м и толщиной $h = 0,005$ м. Механические характеристики материала цилиндра: плотность $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³; модуль Юнга $E = 2,06 \cdot 10^{11}$ Па; предел пластичности $\sigma_s = 1,04 \cdot 10^9$ Па; предел прочности $\sigma_b = 1,45 \cdot 10^9$ Па; предел пластичности по деформациям $\varepsilon_s = 5,1 \cdot 10^{-3}$; параметры динамических характеристик материала: $n = 3,75$; $D = 5,6 \cdot 10^2$ с⁻¹. В процессе деформирования он соударялся с цилиндром с внутренним радиусом $a_0 = 0,033$ м, наружным $b_0 = 0,043$ м и толщиной $h = 0,01$ м из такого же материала. На рис. 2 приведено изменение температуры для точек наружного радиуса внутреннего цилиндра при адиабатическом разогреве в результате пластического деформирования до момента контактного взаимодействия (200...250°C) и в про-

процессе соударения цилиндров. Последующее падение температуры при совместном деформировании цилиндров для этих же точек представлено на рис. 3 (кривая 1). Там же дано сравнение результатов расчета с экспериментальной (кривая 2) и расчетной (кривая 3) зависимостями, полученными А. А. Дерibasом [5].

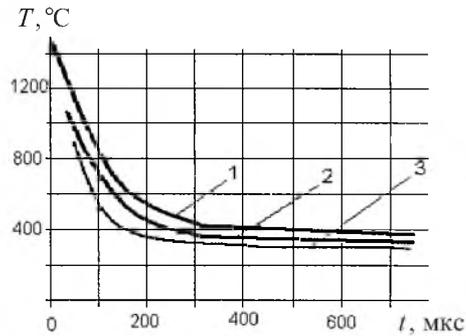
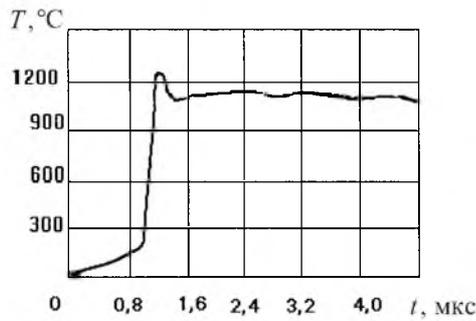


Рис. 2. Изменение температуры в зоне контакта.

Рис. 3. Падение температуры при совместном деформировании цилиндров.



Рис. 4. Фрагмент теплообменного аппарата.

На рис. 4 показан фрагмент теплообменного аппарата трубчатого типа с тонкостенной трубной доской, полученный по предложенной технологии.

Заключение. Разработана математическая модель сварки-пайки взрывом с использованием высокопрочных аморфных припоев с учетом динамических свойств материалов. Предложен метод определения рациональных параметров процесса. Приведен пример соединения труб с трубной доской для конкретного теплообменного аппарата. Процесс реализован на экспериментальных образцах (фрагментах теплообменного аппарата).

Резюме

Розглядається процес кінематичного зварювання-паяння тонкостінних трубних дошок і трубних елементів при створенні теплообмінних апаратів. Процес моделюється високошвидкісною контактною взаємодією коаксіальних циліндрів, між якими розташовано тонкий прошарок високоміцного

аморфного припою. Внутрішній циліндр розширюється під дією імпульсного навантаження вибухового типу. При розв'язанні задачі термопружно-пластичності необхідно враховувати динамічні властивості матеріалу. Процес реалізовано на експериментальних зразках.

1. Воробьев Ю. С., Колодяжный А. В., Севрюков В. И., Янотин Е. Г. Скоростное деформирование элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.
2. Колодяжный А. В., Чернобрышко М. В. Термокинетический анализ соударения плоских и цилиндрических слоев // Пробл. машиностроения. – 1999. – Вып. 1. – С. 78 – 80.
3. Колодяжный А. В., Чернобрышко М. В., Яреценко В. Г. Скоростное деформирование тонкостенных конструктивных элементов // Вест. Харьк. гос. политехн. ун-та. – 1998. – Вып. 11. – С. 8 – 13.
4. Kruszka L. and Nowacki W. K. New application of the Hopkinson pressure bar technique to determination of dynamic behavior of materials // Mechanika Teoretyczna i Stosowana. – 1996. – 2, 34. – P. 259 – 280.
5. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.

Поступила 12. 11. 2001