

*К.В. ВАКУЛЕНКО; С.Ю. СОТРИХИН*, канд. техн. наук.;  
*М.В. ЧЕРНОБРЫВКО*, канд. техн. наук; НТУ «ХПИ»

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ ПРИ СОЗДАНИИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Розглядається задача з'єднання двох товстих стрижнів. Розв'язано рівняння нестационарної теплопровідності, результати якого дають можливість оцінити необхідні температурні умови пайки конструкційних елементів.

The problem of connection of two thick cores is considered. The equation of non-stationary heat conductivity is solved. Results of the decision allow to estimate necessary temperature conditions of the soldering of constructional elements.

**Состояние проблемы.** В современном транспортном машиностроении требования, предъявляемые к прочностным свойствам сварных и паяных швов, диктуются необходимостью обеспечения надежности и безопасности грузоперевозок и пассажиропотоков, а также требованию долговечности получаемых конструкций. Известно, что при получении сварного шва основной материал конструкции подвергается значительным термонагрузениям [1]. Это, в свою очередь, может приводить к изменениям его прочностных свойств. Хорошо известно [2], что качество получаемого сварного шва зависит от целого ряда факторов, обеспечение которых порой затруднено. Также можно заметить, что конструкционные элементы, работающие в условиях повышенной влажности, подвержены усиленной коррозии в зоне сварного соединения. Все вышеизложенное привело к тому, что наряду со сваркой широкое распространение также получила пайка. Важнейшее достоинство пайки – возможность проведения процесса с сохранением механической структуры и прочности соединяемых элементов. Однако, прочностные свойства получаемой конструкции в целом зависят от припоя, применяемого при ее изготовлении. С появлением высокопрочных припоев стала возможной технология высокотемпературной пайки, при которой прочность получаемого соединения не уступает, а порой и превосходит прочность основного материала.

Применение высокотемпературных припоев требует жесткого контроля за температурой протекающего процесса, так как недостаточный разогрев не даст прочного соединения, а перегрев конструкции ведет к разупрочнению и даже хрупкости основного материала. Этих эффектов можно избежать, используя разогрев конструкции импульсными источниками тепла, например, импульсным током, так как кратковременность термонагружения позволяет прогреть слой припоя до необходимых температур, не изменив физических свойств материала основной конструкции в силу теплооттока.

Исследования в области высокоскоростных процессов деформирования контактирующих поверхностей и динамического термоупругопластического напряженного состояния [3], а также в области пайки [4] показали возмож-

ность осуществления пайки и сварки-пайки.

Однако, связанная динамическая задача термоупругопластического деформирования конструктивных элементов цилиндрической формы не нашла своего достаточного отражения в научной литературе. Решение такой задачи связано с целым рядом трудностей, вызванных сильной нелинейностью исходных уравнений. Одной из составных частей ее решения есть задача нестационарной теплопроводности многослойной конструкции при кратковременном температурном нагреве. Решению этой задачи и посвящена данная статья.

**Физическая постановка задачи.** Рассматриваются два толстых стержня одинакового радиуса из однородного изотропного металла. Между их торцами прокладывается лента из листового высокопрочного припоя по которой пропускают сильный импульсный ток от энергетической установки. В результате этого происходит разогрев припоя и соприкасающихся к нему краев стержней. На рис.1 показано расположение составных элементов при пайке встык: 1, 2 – соединяемые стержни; 3 – лента припоя; 4 – зона пайки.

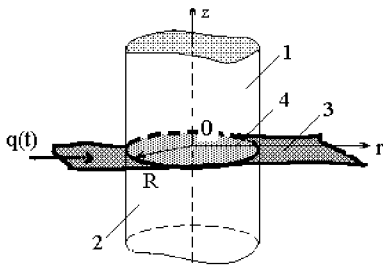


Рисунок 1 – Схема расположения конструктивных элементов

Необходимо нагреть слой припоя до температуры плавления. Величина теплового потока зависит от величины пропускаемого по припою тока и должна выбираться из результатов численного эксперимента для каждой конкретной толщины слоя припоя и величины тока, достаточной для его расплавления. Исследуя температурное поле в плоскости припоя, можно прогнозировать поведение последнего под действием температурного нагружения.

**Математическая постановка задачи.** Итак, исследуется задача нестационарной теплопроводности для толстых стержней в цилиндрической системе координат. В силу осевой симметрии конструкции выбираем систему уравнений в двумерной постановке. Математическая формулировка задачи имеет следующий вид [7]:

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

где  $T = T(r, z, t)$  – температура системы;

$t$  – время;

$r, z$  – цилиндрические координаты;  
 $a_T$  – коэффициент температуропроводности.  
Начальное условие:

$$T(r, z, 0) = T_0 = const, \quad (2)$$

где  $T_0$  – начальная температура конструкции.

Граничное условие по радиусу:

$$\left. \frac{dT_{np}}{dn} \right|_{\substack{r=R \\ z=0}} = q(t), \quad (3)$$

где  $T_{np} = T_{np}(r, z, t)$  – температура припоя;  $n$  – направление внутренней нормали к поверхности цилиндра в области припоя;  $q(t)$  – функция, характеризующая интенсивность теплового потока, определяемая из условий прогревания стержней.

В предположении идеального теплового контакта между торцами стержней и слоем листового припоя, остальные граничные условия запишутся в следующем виде:

$$T_1 = T_2 = T_{np}; \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = \lambda_{np} \frac{\partial T_{np}}{\partial z}, \quad (5)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{np}$  – коэффициенты теплопроводности первого, второго стержней и слоя припоя соответственно;  $T_1, T_2, T_{np}$  – температура вышеуказанных составляющих конструкции.

Решение уравнения нестационарной теплопроводности (1) с начальным (2) и граничными (3-5) условиями, выбираем в виде [8]:

$$T = T_{cp} - \frac{1}{T_{cp} - T_0} (T_{cp} - T_1)(T_{cp} - T_{II}), \quad (7)$$

где  $T_{cp}$  – температура среды, предполагаем, что  $T_{cp} = const$ ;  $T_1 = T_1(r, t)$ ;  $T_{II} = T_{II}(z, t)$ .

Таким образом, задача распадается на две независимые. Первая – распределение температурного поля вдоль радиальной координаты во времени, а вторая – вдоль длины цилиндра во времени.

Дальнейшее решение задачи проводится численно-аналитическими методами согласно известных методик решения задач нестационарной теплопроводности.

**Численные примеры.** Рассматривался случай сваривания двух металлических стержней из стали X18H10T с радиусом  $R = 10$  мм листовым аморфным припоем никелевой группы, толщиной 1,5 мм. Источником импульсного тока служила магнитно-импульсная установка МИУ-20 со следующими основными параметрами: максимальная запасаемая энергия 20 кДж, номинальное напряжение емкостного накопителя 20 кВ, емкость накопителя 100 мкФ, собственная индуктивность разрядного контура 120 нГн.

На рис. 2 представлены графики разогрева слоя припоя в точках с коор-

динами  $r = R$  (кривая 1),  $r = R/2$  (кривая 2) и  $r = 0$  (кривая 3) при воздействии нагрузки в течение 100 мкс.

Анализ графика дает возможность определить момент прогревания слоя припоя до температуры плавления и отследить интервал времени, необходимый для соединения слоев. Причем, расчет разогрева стержневой конструкции производился с учетом теплооттока по координате  $z$ .

Рассмотренная задача решалась в предположении малости толщины слоя припоя по отношению к величине радиуса конструкции. Если же это отношение не мало, то модель задачи необходимо рассматривать с точки зрения прогревания трехслойной конструкции. Поскольку, если толщина припоя окажется много больше толщины скин-слоя (определяющегося, как известно, параметрами энергетической установки), разогрев припоя будет происходить неравномерно по его толщине от границ контакта с торцами стержней до срединной поверхности. В этом случае граничащие со стержнями слои, вследствие концентрации тока будут иметь температуру несколько выше.

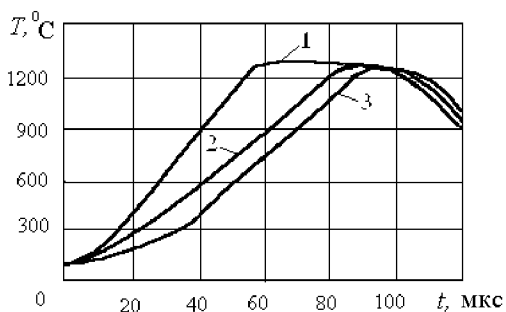


Рисунок 2 – Температура прогревания слоя припоя.

**Выводы.** Решение поставленной задачи теплопроводности позволяет оценить температурные характеристики технологического процесса пайки стержневых конструкционных элементов, выработать оптимальные параметры энергетической установки и подобрать материал припоя. Она является составной частью исследования прочностных свойств паяного соединения. Однако, не следует забывать, что контроль и оптимизация термонапряжений всей конструкции требует дальнейшего использования полученных результатов для решения задачи связанной термоупругопластичности.

**Список литературы:** 1. Харченко В.В. Моделирование процессов высокоскоростного деформирования материалов с учетом вязкопластических эффектов. – Киев.: ИПП НАН Украины, 1999. – 280 с. 2. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с. 3. Воробьев Ю.С., Колодяжный А.В., Севрюков В.И. и др. Скоростное деформирование элементов конструкций. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с. 4. Колодяжный А.В., Вакуленко К.В., Чернобрылько М.В. Исследование температурных напряжений коаксиальных цилиндров при высокоскоростном деформировании // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – 2003. вип. 18. “Підвищення надійності відновлюємих деталей машин. Фізичні та комп’ютерні технології”. – С. 120-

125. 5. Колодяжний А.В., Вакуленко К.В., Чернобрыко М.В. Ярещенко В.Г. Учет тепловыделения при соударении цилиндрических оболочек с различными скоростями скольжения // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве: Труды 6-й Международной научно-технической конференции, 10-11 октября 2002 г. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2002. – С. 272-275. 6. Петрунин И.Е. Metallovedenie pайки / Петрунин И.Е., Маркова И.Ю., Екагова А.С. – М.: Металлургия, 1976. – 263 с. 7. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966. – 724 с. 8. Коваленко А.Д. Термоупругость пластин и оболочек. – Киев: Изд-во Киевского университета, 1971. – 284 с.

*Поступило в редакцию 27.05.04*

УДК 539.3

**С.М.ВЕРЕЩАКА**, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»

## **К ДИСКРЕТНО-СТРУКТУРНОЙ ТЕОРИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧЕК С ДЕФЕКТАМИ СТРУКТУРЫ**

Пропонується варіант дискретно-структурної теорії багатослойних анізотропних оболонок обертання з дефектами структури у вигляді локальних ділянок непроклею. Рівняння рівноваги та геометричні співвідношення отримані з урахуванням впливу деформацій поперечного зсуву та обтинення на напружено-деформований стан суцільностінчатих конструкцій із композиційних матеріалів у геометрично нелінійній постановці.

The variant of the discrete - structural theory of the multilayered anisotropic of shells of rotation with defects of structure such as local sites non-gue is offered. At a conclusion of the equations of balance and geometrical ratio the influence of deformations of cross shift and transverse pressure on is intense – is deformed a status of thin-walled designs from composite materials in vectorially nonlinear production is taken into account.

Постановка контактної задачі механіки многослойних пластинок і оболонок дані в [1-5], де на основі дискретного підходу побудовані функціонали і отримані системи рівнянь для рішення таких задач при умові неідеального контакту слоев. Метод рішення нелінійних задач о контакте между двумя оболочками разной формы и эквидистантными слоями предложено в книзі [6]. Детальний аналіз останніх результатів і напрямлений розвитку дискретно-структурної теорії слоистих пластин і оболонок можна знайти в огляді [7].

В даній роботі пропонується варіант дискретно-структурної теорії многослойних анізотропних оболонок обертання з дефектами структури типу локальних участків непроклею. При виведенні рівнянь рівноваги і геометричних співвідношень враховується вплив деформацій поперечного зсуву і обжаття на напружено-деформоване стан тонкостінних конструкцій із композиційних матеріалів в геометрично нелінійній постановці.

**Постановка задачі.** В відповідності з дискретно-структурною теорією математическа модель розглядаємої здесь многослойної оболочкі складає з  $n$  тонких анізотропних слоев (рис. 1). Тонкою вважається оболочка(слой), якщо величиною відносної товщини  $h/R_{min}$  ( $R_{min}$  – мінімальне значення одного из