

ТЕПЛОВОЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ РАССЛОЕНИЙ В БИМЕТАЛЛАХ

А.П. Пудовкин¹, В.Н. Чернышов², А.В. Колмаков³, Ю.В. Плужников³

Кафедры: «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» (1), «Криминалистика и информатизация правовой деятельности» (2), ТГТУ; ОАО «Завод подшипников скольжения», г. Тамбов (3)

Представлена членом редколлегии профессором С.В. Мищенко

Ключевые слова и фразы: биметалл; расслоения; теплопроводность изделий; теплофизические процессы.

Аннотация: Рассмотрены вопросы влияния расслоений в биметаллах на распределение температурного поля. Предложен метод неразрушающего контроля расслоений в биметаллах.

Повышение качества продукции, увеличение ее надежности и долговечности – важная народнохозяйственная задача, успешное решение которой зависит от надежного контроля на всех этапах производства, начиная от заготовок и полуфабрикатов и кончая готовым изделием. Борьба за повышение качества продукции предполагает своевременное выявление и предупреждение появления дефектов в материале.

Для изделий из антифрикционного биметалла одним из основных показателей качества является прочность сцепления слоев, которая зависит от сплошности соединения компонентов биметалла при пластической деформации методом холодной прокатки. Выявление несплошностей (расслоения) в процессе прокатки является актуальной задачей. В дефектоскопии для контроля металлов и изделий чаще всего применяют визуально-оптические, капиллярные, магнитные, токовых-ревые, ультразвуковые и радиационные методы. В последнее время все большее применение находит и теплотрический метод неразрушающего контроля качества.

Холодная сварка металлов при их совместной прокатке обуславливается явлением схватывания металлов. Поверхность металлических тел имеет макро- и микронеровности и покрыта различными пленками (окислы, жировые и масляные пленки, пленки адсорбированных газов). В процессе холодной сварки поверхностные микронеровности сглаживаются, а твердые пленки растрескиваются. Адсорбированные молекулы паров и газов, а также остатки загрязнений остаются при этом зажатými между осколками твердых поверхностных пленок. В промежутки между растрескивающимися пленками выходят внутренние незагрязненные металлические поверхности, которые под давлением вступают в непосредственный контакт и свариваются (рис. 1) [1].

В работе рассматривается возможность использования теплотрического метода контроля несплошности соединения компонентов биметалла в процессе соединения подката из чистого алюминия с антифрикционным сплавом АО10-1 [2].

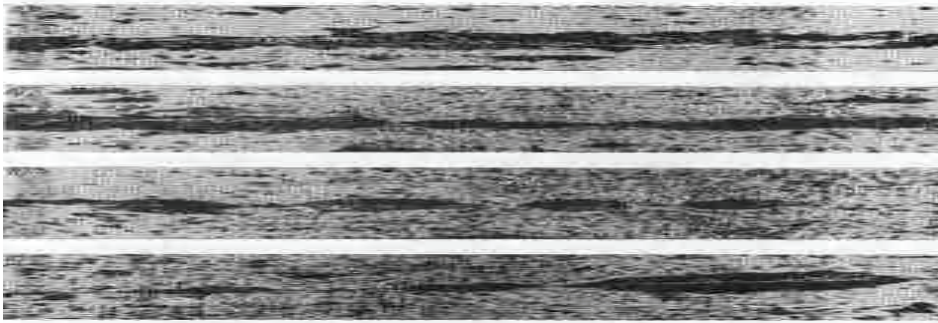


Рис. 1 Образование сварного соединения при прокатке биметалла алюминий-сплав АО10-1

Тепло от одной соприкасающейся поверхности к другой в общем случае может передаваться следующими путями:

- 1) теплопроводностью через места непосредственного контакта;
- 2) теплопроводностью через среду, заполняющую пространство между выступами шероховатости контактирующих поверхностей;
- 3) конвективным переносом тепла средой, заполняющей это пространство;
- 4) лучистым теплообменом между поверхностями.

Ограниченные размеры зазоров в зоне контакта препятствуют возникновению конвективных токов. В обычных условиях соприкосновения при умеренном температурном скачке поток тепла, передающийся излучением, составляет небольшую долю от общего потока. В условиях реального контакта шероховатых поверхностей теплопередача в зазоре обуславливается только теплопроводностью среды, т.е. тепло от одной соприкасающейся поверхности к другой передается теплопроводностью через места непосредственного контакта и через прослойку среды.

Задача о температурном поле при нагреве сосредоточенным источником тепла постоянной плотности q_0 двухслойного материала в предположении, что контакт между отдельными слоями является идеальным, т.е. на границе раздела выполняется равенство температур и тепловых потоков, рассмотренная в работе [3], формулируется следующим образом:

$$\frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2}; \quad t > 0, \quad h \geq z \geq 0; \quad \frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}; \quad t > 0, \quad \infty > z \geq h. \quad (1)$$

Краевые условия задачи имеют вид:

$$z = 0 \quad -\lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} = q_0, \quad (2)$$

$$z = h \left\{ T_1 = T_2; \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \right\}, \quad (3)$$

$$t = 0, \quad T_1 = T_2 = 0. \quad (4)$$

Соотношение (3) описывает идеальный тепловой контакт между слоями (равенство температур и тепловых потоков на границе контактирования).

Решение задачи (1)-(4) имеет вид [4]:

$$T_1(z, t) = \frac{2q_0}{\lambda_1} \sqrt{a_1 t} \cdot \text{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{a_1 t}} \right) + \frac{2q_0 \sqrt{a_1 t}}{\lambda_1} \sum_{n=1}^{\infty} (q)^n \left[\text{ierfc} \frac{2nh+z}{2\sqrt{a_1 t}} + \text{ierfc} \frac{2nh-z}{2\sqrt{a_1 t}} \right]; \quad (5)$$

$$T_2(z,t) = \frac{2q_0}{\lambda_1} \sqrt{a_1 t} \cdot (1-q) \sum_{n=1}^{\infty} (q)^n \operatorname{ierfc} \left[\frac{(2n+1)h + (z-h)\sqrt{a_1/a_2}}{2\sqrt{a_1 t}} \right], \quad (6)$$

где

$$q = \frac{\lambda_1/\sqrt{a_1} - \lambda_2/\sqrt{a_2}}{\lambda_1/\sqrt{a_1} + \lambda_2/\sqrt{a_2}}, \quad (7)$$

$$\operatorname{ierfc}(u) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} - u(1 - \operatorname{erf}(u)), \quad u = \frac{z}{2\sqrt{at}}, \quad (8)$$

$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp[-u^2] du$ – функция ошибок Гаусса, функции $\operatorname{erf}(u)$ и $\operatorname{ierfc}(u)$ табулированы [5].

В уравнении (5) первый член определяет поверхностный нагрев однородного материала, а второй член выражает поправку к температуре, обусловленную влиянием второго слоя с другими теплофизическими параметрами и конечностью толщины первого слоя.

Результаты расчетов по уравнениям (5) и (6) для двухслойной системы алюминий–сплав АО10-1, представляющих интерес для нагрева сосредоточенным источником тепла (лазером) двухслойных изделий, приведены на рис. 2, на котором даны параметры расчетов температуры для однослойной пластины из алюминия, выполненные по формуле

$$T(z,t) = \frac{2q_0}{\lambda} \sqrt{at} \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right). \quad (9)$$

Как видно, температура в однослойной пластине снижается быстрее, чем в двухслойной, что обусловлено меньшей теплопроводностью материала нижнего слоя.

Контактирование на границе раздела слоев биметаллов может быть и неидеальным (в местах расслоений), т.е. имеется скачок температуры на границе кон-

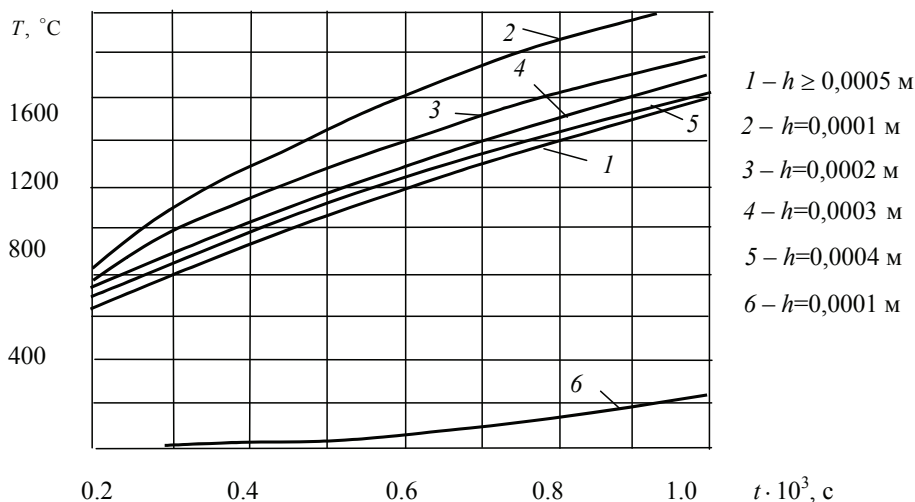


Рис. 2 Зависимости температур от времени действия источника:

- 1 – на поверхности полубесконечного тела из алюминия;
- 2, 3, 4, 5 – на поверхности двухслойного тела для алюминия и сплава АО10-1;
- 6 – на поверхности контакта алюминия со сплавом АО10-1

тактирования при равенстве тепловых потоков. Отличие от задачи с идеальным контактом связано с изменением граничного условия (3), которое для неидеально-го контакта имеет вид:

$$z = h \begin{cases} -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \alpha_1 (T_1 - T_2); \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, \end{cases} \quad (10)$$

где параметр α_1 имеет смысл величины, обратной термическому сопротивлению контакта.

Для одномерной задачи, но с условием (10) неидеальности контакта между слоями биметалла, решение задачи (1), (2), (4), (10) о температурном поле для малых значений времени имеет вид [6]:

$$T_1(z, t) = \int_0^\infty \frac{\bar{q}(s) s J_0(sr) \operatorname{ch}[(h-z)s] ds}{\lambda_1 s \operatorname{sh}(hs) + \alpha_1 \operatorname{ch}(hs)} - \frac{2}{h} \sum_{n=1}^\infty \frac{\mu_n \cos[\mu_n(1-z/h)] \exp(-\mu_n^2 a_1 \tau / h^2)}{(\lambda_1 + \alpha_1 h) \sin \mu_n + \lambda_1 \mu_n \cos \mu_n} \times \\ \times \int_0^\infty \frac{\bar{q}(s) s J_0(sr) \exp(-s^2 a_1 \tau) ds}{s^2 + \mu_n^2 / h^2}, \quad (11)$$

где s – параметр преобразования по Ханкелю, p – по Лапласу; $J_0(sr)$ – функция Бесселя нулевого порядка; r – радиус пятна нагрева; μ_n , σ – корни уравнения

$$\mu / \chi = \operatorname{ctg} \mu, \quad \chi = \alpha_1 h / \lambda_1, \quad \mu \sqrt{-1} = h \sqrt{s^2 + p / a_1}; \quad (12)$$

$$\bar{q}(s) = q_0 \frac{\exp(-s^2 / 4k)}{2k}. \quad (13)$$

Помещая начало координат на границу раздела слоев, решение $T_1(z, t)$ имеет вид

$$T_1(z, t) = \frac{1}{\lambda_1} \int_0^\infty \frac{\bar{q}(s) J_0(sr) [\lambda_1 (1 + \lambda_2 s / \alpha_1) \operatorname{ch}(sz) - \lambda_2 \operatorname{sh}(sz)]}{\lambda_1 \operatorname{sh}(hs) (1 + \lambda_2 s / \alpha_1) + \lambda_2 \operatorname{ch}(hs)} ds, \quad (14)$$

где $h \leq z \leq 0$.

Выражение (11) справедливо в том случае, когда $t < t_a$,

$$t_a \leq \frac{\lambda_2^2}{a_2 \alpha_1^2} \cdot 10^{-2}. \quad (15)$$

Для численных расчетов по уравнению (11) необходимо знание параметра α_1 . Точное значение α_1 найти достаточно трудно. Для качественной оценки α_1 воспользуемся данными работы [7]

$$\alpha_1 \cong 2\lambda_c / h_{\max}, \quad (16)$$

где λ_c – коэффициент теплопроводности воздуха; h_{\max} – максимальная высота расслоения в биметалле. В частности, для $\lambda_c = 0,024$ Вт/(м·К), $h_{\max} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м получим $\alpha_1 = 9,6 \cdot 10^4$ Вт/(м²·К).

Для численных расчетов были выбраны следующие данные. Верхний слой биметалла из алюминия толщиной $h = 0,1$ мм, нижний слой из сплава АО10-1

($\lambda = 160 \text{ Вт/(м·К)}$). Диаметр пятна нагрева выбирался равным $0,05 \text{ мм}$, что соответствует значению коэффициента сосредоточенности $k = 0,16 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ при нормальном распределении плотности потока.

На рис. 3 и 4 показаны зависимости температуры на поверхности и на контакте в верхнем слое биметалла от времени, полученные с помощью соотношения (11) для длительности импульса $t < 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Из графиков видно, что величина α_1 оказывает заметное влияние на вид кривой разогрева – на контакте слоев при уменьшении параметра α_1 установившееся значение температуры достигается раньше. Это указывает на то, что длительность импульса теплового воздействия с учетом неидеальности контакта должна быть уменьшена по сравнению с длительностью импульса, рассчитанного для случая идеального контакта.

На рис. 5 показаны расчетные зависимости температуры на контакте от α_1 , полученные с помощью соотношения (14) при длительностях импульса, больших 10^{-3} с , соответствующих наступлению стационарного состояния.

При $\alpha_1 \cong 4 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ разность температур на контакте может достигать $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

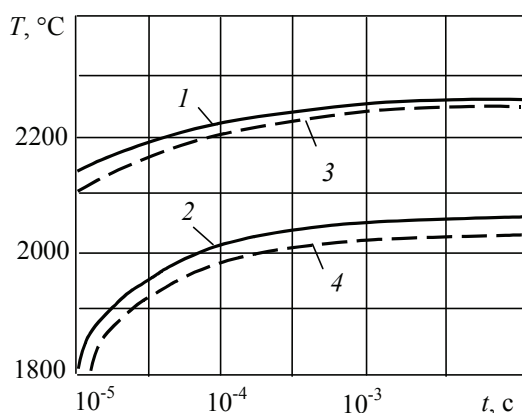


Рис. 3 Зависимость температуры на поверхности верхнего слоя биметалла (Al) при $r = 0$ от времени действия импульса источника тепла:

1, 3 – $\alpha_1 = 4 \cdot 10^4$; 2, 4 – $\alpha_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

— — — — расчетное значение ; — — — — экспериментальное значение

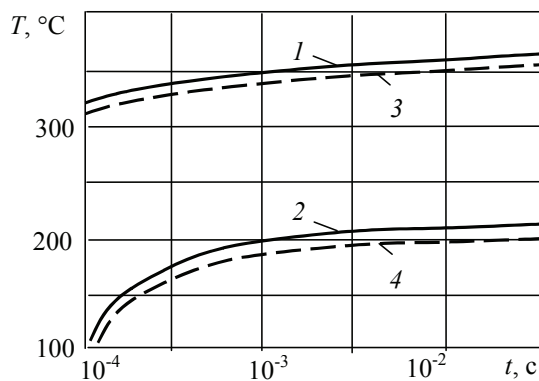


Рис. 4 Зависимость температуры на контакте в верхнем слое биметалла (Al) при $r = 0$ от времени действия импульса источника тепла:

1, 3 – $\alpha_1 = 4 \cdot 10^4$; 2, 4 – $\alpha_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$

— — — — расчетное значение; — — — — экспериментальное значение

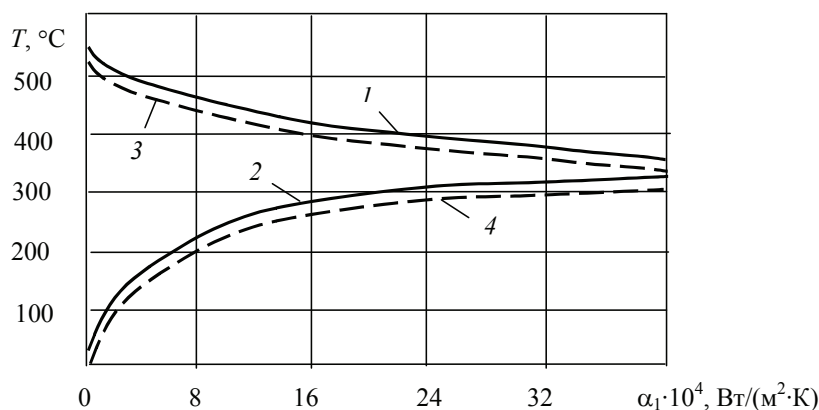


Рис. 5 Зависимость температуры в верхнем (Al) и в нижнем (сплав АО10-1) слоях на контакте при $r = 0$ и $q = 10^{10}$ Вт/м² от α_1 :

1, 3 – T_1 ; 2, 4 – T_2

— — — — — расчетное значение; — — — — — экспериментальное значение

Неидеальность контакта приводит к росту температуры поверхности верхнего слоя биметалла по сравнению со случаем идеального контакта (см. рис. 3), поэтому по изменению температуры на поверхности верхнего слоя биметалла можно судить о наличии или отсутствии расслоений при контроле несплошности соединения слоев биметалла.

Для выявления несплошности соединения слоев биметалла могут быть использованы и лазеры с непрерывной генерацией, создающие движущиеся источники тепла при перемещении по поверхности пятна нагрева радиусом r_f (рис. 6). Если скорость перемещения источника велика, то нормально-круговой источник на поверхности полубесконечного тела становится нормально-линейным, и процесс распространения тепла описывается уравнением

$$T(y, z, t) = \frac{P_0}{v c \rho} \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) \exp\left[-\frac{y^2}{4a(t_0 + t)}\right]}{\sqrt{4\pi a t} \sqrt{4\pi a(t_0 + t)}}, \quad (17)$$

где P_0 – эффективная мощность нормально-кругового источника, Вт; v – скорость перемещения источника, м/с; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, кг/м³; y и z – координаты точки В, лежащей в плоскости, проходящей через центр источника перпендикулярно направлению его перемещения, а время t отсчитывается от момента, когда нормально-линейный источник пересечет эту плоскость; $t_0 = 1/(4ak)$ – постоянная времени.

Наибольшая температура достигается на оси OX

$$T(0, 0, t) = \frac{P_0}{2\pi\lambda v \sqrt{t(t_0 + t)}}. \quad (18)$$

Приведенные выше в работе теоретические исследования тепловых процессов в биметаллических изделиях легли в основу создания метода теплового неразрушающего контроля, сущность которого состоит в следующем.

С помощью движущегося линейного источника тепла постоянной мощности осуществляют нагрев поверхности биметалла и измеряют установившуюся избыточную температуру T_1 в центре источника тепла и температуру T_2 на поверхности биметалла в точке, расположенной на заданном расстоянии y от источника тепла и симметрично относительно его концов (рис. 6), причем $y \ll l$.

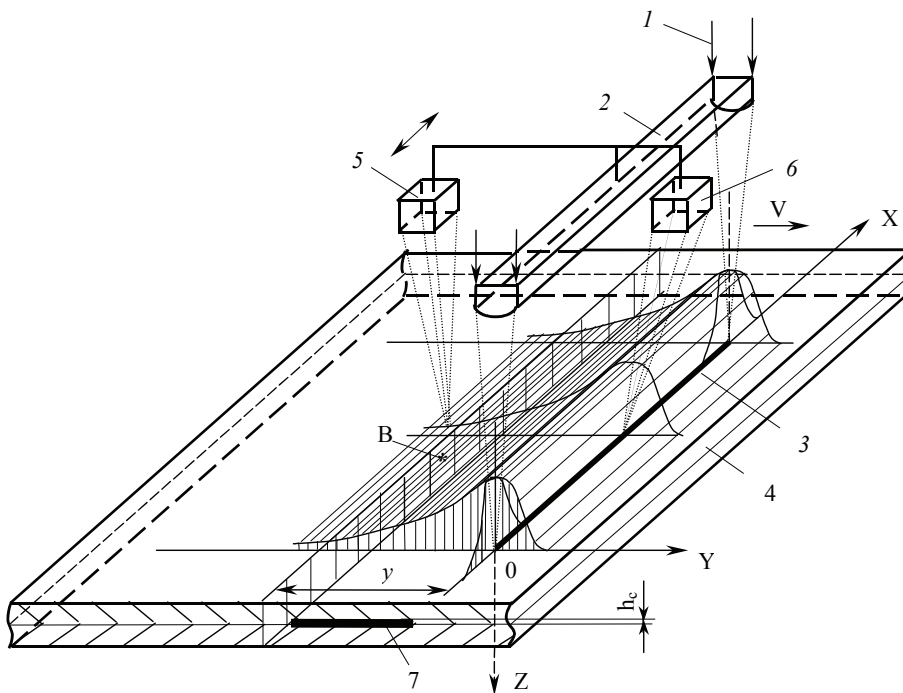


Рис. 6 Схема, иллюстрирующая процесс распространения тепла быстродвижущегося нормально-линейного источника:

- 1 – излучение лазера; 2 – фокусирующая система;
- 3 – сфокусированный нормально-линейный источник;
- 4 – биметалл; 5, 6 – бесконтактные термоприемники;
- 7 – расслоение в биметалле

Термическое сопротивление последовательно соединенных составных стенок [9], ориентированных перпендикулярно тепловому потоку, определяется по формуле

$$R = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n (h_i / \lambda_i S_i), \quad (19)$$

а термическое сопротивление отдельных стенок, соединенных параллельно тепловому потоку, определяется зависимостью

$$1/R = \sum_{i=1}^n (1/R_i) = \sum_{i=1}^n (\lambda_i S_i / h_i), \quad (20)$$

где R_i – термическое сопротивление i -ой стенки; h_i – толщина i -ой стенки; λ_i – теплопроводность i -ой стенки; S_i – площадь изотермической поверхности.

Тепловой поток от источника тепла к точке контроля установившейся избыточной температуры, расположенной на заданном расстоянии x от линии действия источника и симметрично относительно его концов, поступает двумя путями. Первый тепловой поток q_1 идет по первому слою биметалла, второй поток q_2 пронизывает первый слой в перпендикулярном направлении к изделию, расслоение биметалла, а затем идет по второму слою под расслоением и еще раз проходит через расслоение и первый слой биметалла от второго слоя к точке контроля температуры.

На рис. 7 показана тепловая схема. Поскольку разность установившихся избыточных температур, обусловленная сопротивлением различных слоев при тепловом

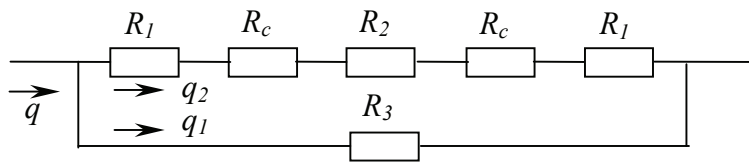


Рис. 7 Тепловая схема

воздействии источником постоянной мощности, определяется в соответствии с зависимостью вида $\Delta T = qR$, то зависимость между температурами T_1 , T_2 и тепловым потоком будет иметь вид:

$$T_1 - T_2 = \Delta T_1 = qR = (q_1 + q_2)R. \quad (21)$$

Результирующее термическое сопротивление рассматриваемой тепловой системы определяется на основании закона Кирхгофа по формуле [9]

$$R = (2R_1 + R_2 + 2R_c)R_3 / (2R_1 + R_2 + 2R_c + R_3), \quad (22)$$

где $R_1 = h_1 / (\lambda_1 lb)$ – термическое сопротивление первого слоя биметалла тепловому потоку q_2 ; $R_2 = (T_3 - T_4) / q$ – термическое сопротивление второго слоя тепловому потоку q_2 ; $R_3 = y / (\lambda_1 lh_1)$ – термическое сопротивление первого слоя тепловому потоку q_1 ; $R_c = h_c / (\lambda_c lb)$ – термическое сопротивление расслоения; λ_1 – теплопроводность верхнего слоя; l , b – соответственно длина и ширина источника тепла; h_1 – толщина верхнего слоя; y – расстояние от источника теплоты до точки контроля установившейся избыточной температуры; h_c – толщина расслоения; λ_c – теплопроводность среды расслоения. Температуры T_3 и T_4 измеряются на поверхности второго слоя соответственно в центре источника тепла и на заданном расстоянии y от линии действия источника тепла.

Подставив зависимость (20) в выражение (19), получим формулу для расчета термического сопротивления в виде:

$$R_c = [qR_3(2R_1 + R_2) - \Delta T_2(2R_1 + R_2 + R_3)] / 2(\Delta T_2 - 2qR_3). \quad (23)$$

Определив величину межконтактного термического сопротивления R_c по измеренным значениям температур T_1 , T_2 , T_3 и T_4 , можно оценить не только наличие расслоения в биметалле, но и площадь этого расслоения по зависимости

$$S_c = R_c \lambda_c b l^2 y / h_c. \quad (24)$$

Экспериментальная проверка влияния расслоений на распределение температурного поля в биметаллах и сравнение результатов с расчетными данными, проведенными по формулам (11) и (14), проводилась на образцах антифрикционного биметалла (Al – сплав АО10-1) размерами 200×200 мм и толщиной слоев 0,1 и 2 мм соответственно для алюминия и сплава. Размеры и расположение расслоений в образцах предварительно выявлялись с помощью ультразвукового дефектоскопа УД2-12. В качестве источника тепловой энергии использовался сфокусированный луч лазера ИЛН-704 диаметром 0,05 мм. Температура в центре пятна нагрева регистрировалась по электромагнитному излучению бесконтактным датчиком ПМ-4. Температура на поверхностях контактирующих слоев измерялась с помощью микротермопар, встроенных в места расслоений. Результаты экспериментов показаны на рис. 3, 4 и 5 (обозначены пунктирной линией).

Таким образом, анализ и экспериментальная проверка показали, что теплотермическими методами [3, 8] неразрушающего контроля возможно контролировать не только толщину слоев биметаллических изделий, но и выявлять возможные расслоения в этих изделиях в процессе их прокатки.

Список литературы

1. Буше Н.А. и др. Подшипники из алюминиевых сплавов. – М.: Транспорт, 1974. – 256 с.
2. Патент RU 2186869, 7 С 22 С 21/00, С 22 F 1/04. Антифрикционный сплав и способ изготовления биметаллической заготовки для подшипников из этого сплава / Ю.В. Плужников, А.В. Колмаков и др. – 2001111414. Заявл. 27.04.2001. Оpubл. 10.08.2002, Б.И. № 22.
3. Метод бесконтактного неразрушающего контроля слоев двухслойных изделий и анализ теплофизических процессов в биметаллах / А.П. Пудовкин, В.Н. Чернышов, Ю.В. Плужников, А.В. Колмаков. – Вестник ТГТУ, Т. 8., №2. – 2002. – С. 190-200.
4. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
6. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Макаров Н.И. К учету влияния неидеальности контакта при сварке лазером разнородных материалов // ДАН СССР. – 1967. – Т. 174, № 4. – С. 824-827.
7. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. – М.: Энергия, 1977. – 328 с.
8. А.с. 1733928, G01 B21/08. Способ неразрушающего контроля толщины пленочного покрытия изделий / А.П. Пудовкин, В.Н. Чернышов и др. – 4448946/25-28-099319. Заявл. 27.06.1988. Оpubл. 1992. Б.И. № 18.
9. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.

Heat Method of Bimetal Separation Diagnostics

A.P. Pudovkin¹, V.N. Chernyshov², A.V. Kolmakov³, Yu.V. Pluzhnikov³

*Departments: "Design of Radio-Electronic and Microprocessor Systems" (1),
"Criminal Law and Legal Activity Informatization" (2), TSTU;
"Plain Bearing Manufacture" plc, Tambov (3)*

Key words and phrases: bimetal; separation; heat conductivity of goods; thermophysical processes.

Abstract: Problems of bimetal separation influence on temperature field distribution are considered. Method of non-destructive control over bimetal separation is offered.

Thermische Methode der Diagnostik der Schichtungen in den Bimetallen

Zusammenfassung: Es sind die Fragen des Einflusses der Schichtungen in den Bimetallen auf die Verteilung des Temperaturfeldes untersucht. Es ist die Methode der nicht zerstörenden Kontrolle der Schichtungen in den Bimetallen angeboten.

Méthode du diagnostic de la démixion dans les bimétaux

Résumé: Sont examinés les problèmes de l'influence des démixions dans les bimétaux sur les champs thermiques. On a proposé la méthode du contrôle non destructif des démixions dans les bimétaux.