

*На правах рукописи*

**ПЛУЖНИКОВ Юрий Владимирович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ  
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА  
БИМЕТАЛЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тамбов 2002

Работа выполнена в Тамбовском государственном техническом университете на кафедрах «Автоматизированные системы и приборы», «Криминалистика и информатизация правовой деятельности».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Чернышов Владимир Николаевич**

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент  
**Пудовкин Анатолий Петрович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Дмитриев Дмитрий Александрович;**  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
**Нагорнов Станислав Александрович**

Ведущая организация: АООТ НИИ «Электромера»,  
г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2002 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д  
212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу:  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, Большой зал.

Отзывы в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу:  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2002 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А. А. Чуриков

---

Подписано в печать 21.11.2002  
Гарнитура Times New Roman. Формат 60×84/16  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем: 0,93 усл. печ. л.; 0,9 уч.-изд. л.  
Тираж 100 экз. С. 722

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Интенсивное развитие современной техники постоянно требует создания и широкого использования конструкционных материалов со специальными свойствами. В связи с этим большие перспективы по применению в различных отраслях промышленности получили биметаллические материалы. Биметаллы являются не только заменителями дефицитных металлов, но и представляют самостоятельную группу промышленных материалов, необходимых при создании новых машин, приборов и различных изделий.

В связи с возрастающим объемом производства биметаллов и изделий из них, повышением требований к их эксплуатационным характеристикам становятся актуальными задачи интенсификации производства и повышения качества готовых изделий и снижения затрат на их изготовление. Решение этих задач связано как с совершенствованием средств контроля качества, так и технологического оборудования для производства биметалла в целом, отдельных агрегатов и узлов.

Для повышения надежности и долговечности работы машин и аппаратов, изготавливаемых из биметаллов, необходимо проводить непрерывный контроль их качества и применять для этих целей методы неразрушающего контроля.

При производстве биметалла и изделий из них основными параметрами качества являются допуски на линейные размеры, формы и расположения поверхностей, которые составляют единицы микрометров, сплошность слоев (расслоений), теплофизические свойства биметаллов.

Стопроцентный контроль толщины слоев при совместной пластической деформации компонентов биметалла с минимальной продольной разнотолщинностью, контроль толщины исходных материалов для производства биметалла, контроль геометрических размеров изделий из биметалла, контроль теплофизических свойств биметалла требуют разработки более эффективных методов и средств непрерывного неразрушающего контроля.

Перечисленные обстоятельства подтверждают актуальность задач, решаемых в диссертационной работе, определяют цель и основные направления исследований.

**Цель работы.** Целью настоящей диссертационной работы является разработка и внедрение новых эффективных методов и информационно-измерительных систем (ИИС) для непрерывного неразрушающего контроля соотношения толщин слоев биметалла в процессе его прокатки и снижения продольной разнотолщинности биметалла, контроля теплофизических свойств слоев биметалла для выявления зон несварки слоев различных биметаллов, контроля геометрических размеров изделий из биметалла.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- на основе электромагнитной теории цепей разработать методы неразрушающего контроля соотношения толщин слоев биметаллов;
- провести анализ теплофизических процессов в биметаллах при бесконтактном контроле качественных характеристик;
- создать более эффективные методы и устройства неразрушающего контроля теплофизических свойств слоев биметалла;
- разработать математическое и программное обеспечение ИИС, реализующей предложенные методы;
- провести анализ возможных источников погрешностей косвенных измерений толщин слоев биметаллов и оценить их величину;
- осуществить экспериментальную проверку результатов работы и внедрить в промышленное производство, научные исследования.

**Методы исследования** базируются на использовании аппарата математической физики, аналитической теории теплопроводности, математическом моделировании, компьютерных технологиях и метрологии.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие научные результаты:

- разработаны оригинальные бесконтактные электромагнитные и теплотрические методы неразрушающего контроля толщины слоев биметаллов, их теплофизических свойств, позволяющие производить непрерывный контроль толщины во время прокатки, обеспечить требуемую точность, значительно снизить продольную разнотолщинность, определять границы зон расслоений;
- разработано математическое и алгоритмическое обеспечение ИИС, позволяющее автоматизировать процесс контроля толщины слоев и качество сварки биметаллов, повысить точность при обработке первичной измерительной информации.

**Практическая ценность** полученных результатов состоит в разработке и внедрении информационно-измерительных систем, реализующих предложенные методы неразрушающего контроля качества биметаллов в процессе его прокатки.

Применение разработанной ИИС позволит повысить оперативность и точность контроля соотношения толщин слоев, теплофизических свойств биметаллов, снизить продольную разнотолщинность, что в итоге обуславливает повышение показателей качества изделий.

Теоретические и практические результаты работы использовались при проведении научно-исследовательских работ по модернизации линии рулонного производства биметалла и разработке системы автоматического контроля толщины вкладышей подшипников скольжения, что позволило увеличить производительность рулонного производства биметалла почти

в 2 раза, значительно расширить номенклатуру по толщине и ширине биметалла.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы приняты к использованию ОАО «Завод подшипников скольжения», г. Тамбов и в учебном процессе ТГТУ.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований, выполненных по теме диссертации, докладывались и обсуждались на конференциях: Международная научная конференция «Информационные технологии при проектировании микропроцессорных систем» (Тамбов, 2000 г.), XV Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» (Тамбов, 2002 г.), VII научная конференция ТГТУ (Тамбов, 2002 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы отражены в 11 печатных работах, получено 4 патента на изобретение РФ.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, двух приложений, изложена на 154 страницах машинописного текста и содержит 33 рисунка, 11 таблиц.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы. Раскрыты научная новизна и практическая ценность, приведены результаты апробации и реализации работы.

**Первая глава** посвящена литературному обзору и постановке задачи исследования. Отмечена важность решения проблемы качества биметаллов и изделий из них, создания и внедрения оперативных неразрушающих бесконтактных методов и средств контроля показателей качества, определяемых теплофизическими и тепловыми процессами.

Исходя из требований высокой производительности и оперативности неразрушающего контроля, показано, что существующие методы и средства не удовлетворяют современным требованиям практики измерений.

Во **второй главе** дано теоретическое обоснование предлагаемых методов неразрушающего контроля соотношения толщин слоев и их теплофизических свойств.

В работе проведен анализ теплофизических процессов в биметаллах при бесконтактном контроле их качественных характеристик с целью определения параметров тепловых режимов нагрева и последовательности проведения измерительных процедур.

Наиболее перспективным источником тепловой энергии для бесконтактного неразрушающего контроля толщины слоев двухслойных изделий при одностороннем доступе к поверхности является лазерное излучение.

Температура предельного состояния в центре пятна нагрева и плотность теплового потока нормально-распределенного источника теплоты имеют вид

$$T_0 = T(0, 0, 0, \infty) = T(x, y, z, t) = P_0 \sqrt{k/\pi} / 2\lambda; \quad (1)$$

$$q_0 = 2\lambda T_m \sqrt{k} / \sqrt{\pi} = 1,128\lambda T_m \sqrt{k}, \quad (2)$$

где  $P_0$  – мощность источника теплоты;  $k=1/r_f^2$  – коэффициент сосредоточенности;  $r_f$  – радиус пятна нагрева;  $\lambda$  – теплопроводность изделия;  $T_m$  – температура плавления.

Соотношение (2) определяет плотность потока, требуемого для достижения температуры плавления  $T_m$  в условиях установившегося процесса. Численные оценки  $q_0$  для ряда металлов с различными теплофизическими свойствами приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Материал | $\lambda$ , Вт/(м·К) | $a$ , м <sup>2</sup> /с | $T_m$ , К | $k$ , м <sup>-2</sup> | $q_0$ , Вт/м <sup>2</sup>         |
|----------|----------------------|-------------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------------|
| Медь     | 389                  | $1012 \cdot 10^{-4}$    | 1356      | $10^6 - 10^8$         | $4,2 \cdot 10^3 - 4,2 \cdot 10^4$ |
| Сталь    | 51                   | $0,15 \cdot 10^{-4}$    | 1808      | $10^6 - 10^8$         | $7,8 \cdot 10^3 - 7,8 \cdot 10^4$ |
| Никель   | 67                   | $0,18 \cdot 10^{-4}$    | 1726      | $10^6 - 10^8$         | $9,7 \cdot 10^3 - 9,7 \cdot 10^4$ |
| Титан    | 15                   | $0,06 \cdot 10^{-4}$    | 2073      | $10^6 - 10^8$         | $2,7 \cdot 10^3 - 2,7 \cdot 10^4$ |
| Алюминий | 209                  | $0,87 \cdot 10^{-4}$    | 933       | $10^6 - 10^8$         | $1,4 \cdot 10^3 - 1,4 \cdot 10^4$ |

Задачи нагрева биметаллов с различными теплофизическими свойствами компонентов представляют существенный интерес для определения толщины слоев и оценки сплошности соединения различных металлов и сплавов методом пластической деформации.

Для практических целей наибольший интерес представляют закономерности изменения температуры в зависимости от времени в точках на поверхности нагрева и границе раздела слоев.

Для одномерного случая нагрева источником тепла постоянной плотности  $q_0$  двухслойной системы алюминий–сталь на рис. 1 приведены результаты расчетов по уравнениям (3) и (4), а для двухслойных систем сплав алюминия АО20-1–алюминий, алюминий–сплав АО20-1 приведены в табл. 2.

$$T_1(z, t) = \frac{2q_0}{\lambda_1} \sqrt{a_1 t} \operatorname{ierfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{a_1 t}} \right) + \frac{2q_0 \sqrt{a_1 t}}{\lambda_1} \sum_{n=1}^{\infty} (q)^n \left[ \operatorname{ierfc} \frac{2nh+z}{2\sqrt{a_1 t}} + \operatorname{ierfc} \frac{2nh-z}{2\sqrt{a_1 t}} \right]; \quad (3)$$

$$T_2(z, t) = \frac{2q_0}{\lambda_1} \sqrt{a_1 t} (1-q) \sum_{n=1}^{\infty} (q)^n \operatorname{ierfc} \left[ \frac{(2n+1)h+(z-h)\sqrt{a_1/a_2}}{2\sqrt{a_1 t}} \right]; \quad (4)$$

$$q = \frac{\lambda_1/\sqrt{a_1} - \lambda_2/\sqrt{a_2}}{\lambda_1/\sqrt{a_1} + \lambda_2/\sqrt{a_2}}; \quad (5)$$

$$ierfc(u) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} - u(1 - erf(u)), \quad u = \frac{z}{2\sqrt{at}}; \quad (6)$$

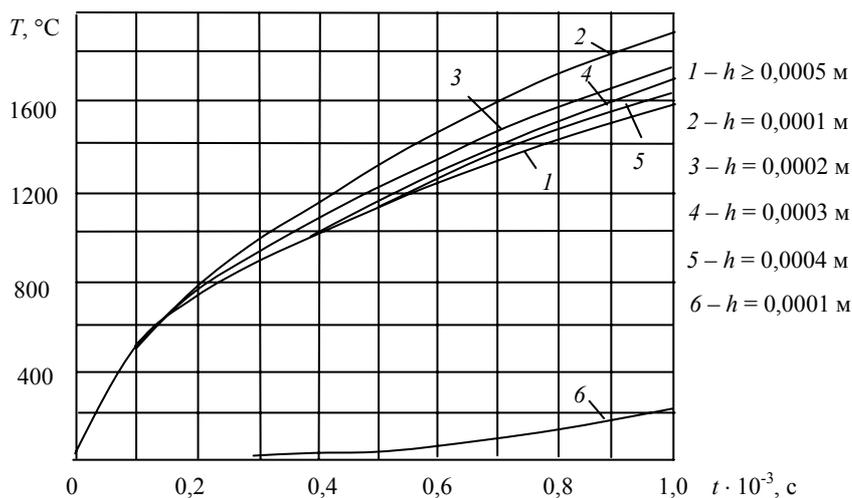
$$erf(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp[-u^2] du - \text{функция ошибок Гаусса,}$$

где  $\lambda, a$  – тепло- и температуропроводность;  $h$  – толщина верхнего слоя;  $t$  – длительность теплового воздействия; индексы 1 и 2 относятся соответственно к верхнему и нижнему слоям.

В уравнении (3) 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.

На рис. 1 приведены также данные расчетов температуры для однослойной пластины из алюминия, выполненные по формуле:

$$T(z, t) = \frac{2q_0}{\lambda} \sqrt{at} ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right). \quad (7)$$



**Рис. 1** Зависимости температур от времени действия источника:  
 1 – на поверхности полубесконечного тела из алюминия;  
 2, 3, 4, 5 – на поверхности двухслойного тела для алюминия и стали;  
 6 – на поверхности контакта алюминия со сталью  
 Таблица 2

| Толщина верхнего слоя биметалла, $h \cdot 10^3$ , мм |                   | Время действия источника, $t \cdot 10^3$ , с |     |     |     |      |      |      |      |      |
|--|-------------------|--|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
|  |                   | 0,1  | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5  | 0,6  | 0,8  | 1,0  |      |
| Биметаллы  | Al – сталь        | 0,1  | 503 | 722 | 890 | 1133 | 1160 | 1277 | 1477 | 1656 |
|  |                   | 0,2  | 503 | 713 | 875 | 1013 | 1135 | 1245 | 1444 | 1620 |
|  |                   | 0,3  | 503 | 712 | 872 | 1008 | 1128 | 1236 | 1431 | 1603 |
|  |                   | 0,4  | 503 | 712 | 872 | 1007 | 1126 | 1234 | 1426 | 1595 |
|  | Сплав АО20-1 – Al | 0,1  | 545 | 765 | 932 | 1070 | 1192 | 1302 | 1406 | 1665 |
|  |                   | 0,2  | 546 | 772 | 945 | 1090 | 1215 | 1330 | 1530 | 1706 |
|  |                   | 0,3  | 546 | 772 | 946 | 1092 | 1220 | 1337 | 1543 | 1720 |
|  |                   | 0,4  | 546 | 772 | 946 | 1092 | 1221 | 1338 | 1545 | 1726 |
|  | Al – сплав АО20-1 | 0,1  | 520 | 777 | 985 | 1166 | 1328 | 1474 | 1738 | 1971 |
|  |                   | 0,2  | 503 | 718 | 893 | 1041 | 1184 | 1314 | 1554 | 1773 |
|  |                   | 0,3  | 503 | 712 | 873 | 1010 | 1139 | 1254 | 1472 | 1666 |
|  |                   | 0,4  | 503 | 712 | 872 | 1007 | 1127 | 1236 | 1435 | 1611 |

Как видно из табл. 2, температура по толщине слоя в однослойной пластине снижается быстрее, чем в двухслойной, что обусловлено меньшей теплопроводностью материала нижнего слоя. Для толщин верхнего слоя биметалла (алюминий – сталь) меньших, чем 0,0003 м и длительности теплового воздействия  $t \geq 0,0005$  с необходимо учитывать теплопередачу к нижнему слою.

Для нагрева биметаллов могут быть использованы лазеры с непрерывной генерацией, перемещающиеся над поверхностью исследуемого изделия с постоянной скоростью  $V$ . При перемещении пятна нагрева радиусом  $r_f$  по поверхности установится квазистационарное состояние, при котором нагретая зона постоянного размера перемещается вместе с источником тепла (рис. 2).

Если скорость перемещения источника велика, то нормально-круговой источник малого радиуса на поверхности полубесконечного тела становится нормально-линейным. Процесс распространения тепла можно описать уравнением:

$$T(x, y, z, t) = \frac{P_0}{2\pi\lambda R} \exp\left[-\frac{(R-x)V}{2a}\right], \quad (8)$$

где  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  – расстояние от точки измерения температуры до центра пятна нагрева;  $x, y, z$  – координаты точки контроля температуры.

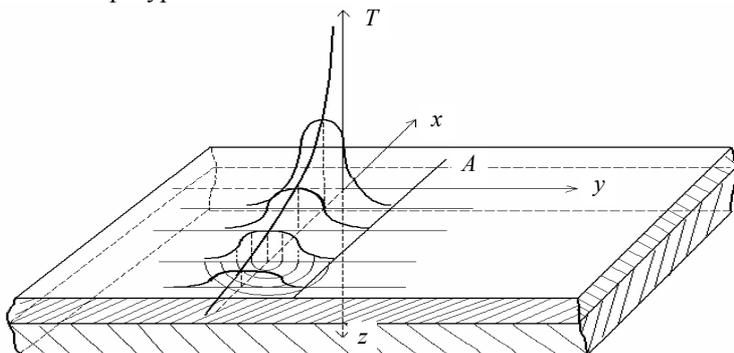


Рис. 2 Схема распространения тепла быстро движущегося источника

Наибольшая температура достигается на оси движения источника:

$$T(x, t) = \frac{P_0}{2\pi\lambda V \sqrt{t(t_0 + t)}}, \quad (9)$$

где  $t_0 = r^2/4a$  – постоянная времени;  $r$  – радиус пятна нагрева;  $t$  – время, отсчитываемое от момента, когда центр нормально-кругового источника теплоты пересек плоскость, которая перпендикулярна к направлению движения и в которой находится точка  $A(x)$ .

Поскольку при определенном расстоянии между точкой контроля температуры и центром пятна нагрева наступит момент равенства  $T(x) = T_{\text{зад}}$ , то, в соответствии с формулой (9), коэффициент теплопроводности определяют по формуле

$$\lambda = \frac{P_0}{2\pi T_{\text{зад}} V \sqrt{t(t_0 + t)}}, \quad (10)$$

где  $T_{\text{зад}}$  – заданное значение избыточной температуры.

Коэффициент температуропроводности определяют по формуле, полученной при подстановке выражения (10) в выражение (8) и имеющей вид:

$$a = \frac{V(R - V\sqrt{t(t_0 + t)})}{2 \ln \left( \frac{T_{\text{зад}} V \sqrt{t(t_0 + t)}}{T(R)R} \right)}, \quad (11)$$

где  $T(R)$  – температура в точке контроля на линии, параллельной линии движения источника теплоты.

Для двухслойного изделия, пронизываемого тепловым потоком в перпендикулярном направлении слоям, измеряемый коэффициент теплопроводности определяется выражением:

$$\bar{\lambda} = m_1\lambda_1 + m_2\lambda_2, \quad (12)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности слоев;  $m_1, m_2$  – коэффициенты, определяющие процентное содержание слоев в единице объема. Зависимость толщины верхнего слоя от измеряемого коэффициента теплопроводности имеет вид:

$$h_1 = h_{\text{max}} (\bar{\lambda} - \lambda_2) / (\lambda_1 - \lambda_2), \quad (13)$$

где  $h_{\text{max}}$  – максимально возможная в тепловом отношении толщина слоя.

В табл. 3 для ряда металлов и сплавов приведены энергетические параметры лазерного излучения.

Таблица 3

| Материал     | $r_f, \text{ м}$ | $t, \text{ с}$       | $q_{0 \text{ min}}, \text{ Вт/м}^2$ | $h_{\text{max}}, \text{ м}$ |
|--------------|------------------|----------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Медь         | $10^{-4}$        | $1 \cdot 10^{-3}$    | $3,39 \cdot 10^9$                   | $5,2 \cdot 10^{-4}$         |
| Алюминий     | $10^{-4}$        | $1,25 \cdot 10^{-3}$ | $1,82 \cdot 10^9$                   | $8,2 \cdot 10^{-4}$         |
| Сплав АО20-1 | $10^{-4}$        | $1,54 \cdot 10^{-3}$ | $1,4 \cdot 10^9$                    | $15,2 \cdot 10^{-4}$        |
| Сталь        | $10^{-4}$        | $6,87 \cdot 10^{-3}$ | $0,445 \cdot 10^9$                  | $25,2 \cdot 10^{-4}$        |

Результаты анализа были использованы для разработки бесконтактных методов НК теплофизических свойств и толщин слоев двухслойных изделий с целью контроля сплошности соединения различных металлов и сплавов методом пластической деформации.

В работе приводится ряд разработанных методов контроля толщины слоев и теплофизических свойств двухслойных изделий, отличительными особенностями которых являются высокая оперативность, широкие функциональные возможности, удобство применения в технологическом процессе рулонного производства биметалла.

Сущность метода бесконтактного неразрушающего контроля толщины и теплофизических свойств изделий состоит в следующем.

Включают источник 1 (рис. 3) и начинают его перемещение и датчика температуры 2 над исследуемым изделием с постоянной скоростью  $V$ . Датчик температур 2 движется при этом по линии перемещения источника энергии с отставанием от него. Затем изменяют расстояние отставания точки контроля температуры от центра пятна нагрева источника энергии до достижения в точке контроля избыточной температуры заданного значения. Далее от точки регистрации избыточной температуры изменяют расстояние точки контроля датчика температуры 8 от линии движения источника энергии до достижения в точке контроля датчиком 8 избыточной температуры второго заданного значения. При этом на регистрирующем узле 13 фиксируется местоположение датчика 8, соответствующее определенной толщине прогрева исследуемого изделия.

Затем изменяют мощность источника энергии в соответствии с зависимостью

$$q_i = q \left( \frac{n-i}{n} \right), \quad i=1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (14)$$

и изменяют расстояние от точки регистрации температуры термоприемником 8 до линии движения источника тепла до тех пор, пока контролируемая термоприемником 8 избыточная температура станет равной второму заданному значению, а также измеряют термоприемником 2 новые значения температур при каждой мощности источника энергии и по формулам (10) и (11) определяют новые значения коэффициентов тепло- и температуропроводности тепловой системы.

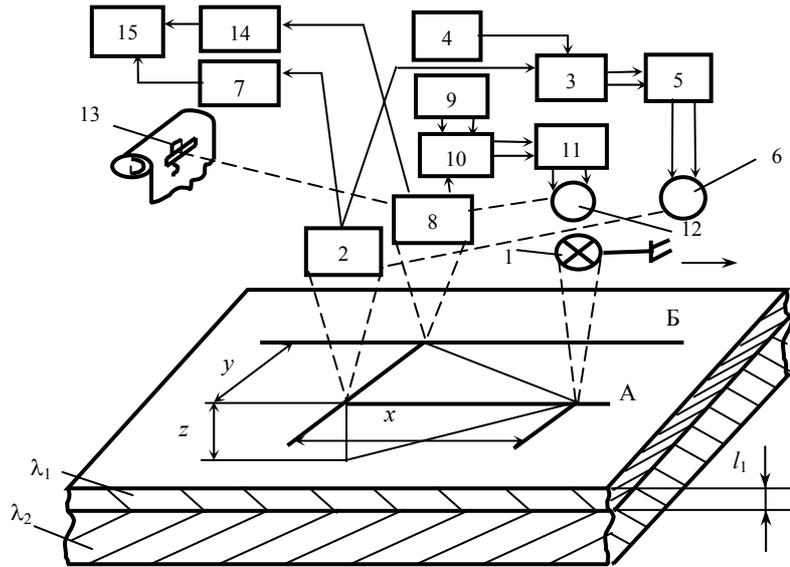


Рис. 3 Устройство бесконтактного неразрушающего контроля толщины и теплофизических свойств изделий

Поскольку расстояние  $y$  от точки регистрации температуры термоприемником 8 до линии движения источника тепла есть толщина прогрева исследуемого изделия, то можно построить зависимости тепло- и температуропроводности от толщины прогрева тепловой системы при разной мощности источника энергии, по которой определяют толщину и теплофизические свойства верхнего слоя изделия.

Сущность второго метода контроля соотношения слоев биметаллов состоит в следующем.

Толщину движущейся биметаллической полосы измеряют индуктивным микрометром,

действие которого основано на преобразовании отклонений толщины полосы, воспринимаемых двумя роликами, в изменение индуктивности преобразователя, обмотки которого образуют мостовую схему, питаемую от генератора. Сигнал с диагонали моста подается на миллиамперметр, градуированный в миллиметрах отклонения полосы от номинала, и через усилитель на микропроцессор.

Накладной вихретоковый датчик, состоящий из возбуждающей и двух измерительных катушек, жестко соединенный с подвижным сухарем индуктивного микрометра, устанавливают на фиксированном расстоянии от поверхности биметаллической полосы, с генератора на возбуждающую катушку датчика подают переменный ток такой частоты  $f_1$ , чтобы глубина проникновения  $\delta$  возбуждаемых вихревых токов в объекте контроля была заведомо меньше толщины первого слоя биметалла. Величина глубины проникновения вихревых токов используемой частоты в материал первого слоя биметалла рассчитывается по известной формуле

$$\delta_1 = \sqrt{2 / (\omega_1 \sigma \mu_a)}, \quad (15)$$

где  $f$  – частота тока возбуждения;  $\sigma$ ,  $\mu_a$  – соответственно удельная электрическая проводимость и абсолютная магнитная проницаемость материала верхнего слоя биметалла, которая соответствует затуханию амплитуды вихревых токов в 2,72 раза по сравнению со значением амплитуды на поверхности объекта. Далее измеряют интенсивность электромагнитного излучения первой измерительной катушкой, изменяют расстояние между измерительными катушками до величины  $5\delta_1$  и измеряют интенсивность электромагнитного излучения второй катушкой.

Изменение расстояния между катушками осуществляют до тех пор, пока разностный сигнал на выходе вычитающего блока будет отсутствовать. При этом местоположение второй катушки, соответствующее величине, равной  $5\delta_1$ , преобразованное преобразователем перемещения в электрический сигнал, фиксируется в микропроцессоре.

После этого меняют частоту тока возбуждения на  $f_2$  и повторяют аналогичные измерения на этой частоте, сравнивают на второй частоте тока возбуждения величину, равную  $5\delta_2$ , с измеренным расстоянием между измерительными катушками. Если величины совпадают, то измерение повторяют на следующих частотах  $f_i < f_{i-1}$  до тех пор, пока измеренные расстояния между измерительными катушками не превысят расчетную величину  $5\delta_i$ . В этом случае величина  $h = 5\sqrt{2 / (\omega \sigma \mu_a)}$  будет соответствовать толщине верхнего слоя биметалла. Толщину второго слоя  $h_0$  определяют как разницу между толщиной биметалла  $H$ , измеренной индуктивным микрометром, и толщиной верхнего слоя  $h$ , измеренной накладным вихретоковым датчиком.

Следующий метод непрерывного контроля толщины слоев биметалла с ферромагнитным основанием осуществляется следующим образом.

Биметаллическая полоса и эталон намагничиваются с помощью П-образных электромагнитов, которые установлены со стороны ферромагнитного слоя биметалла. В электромагнитах магнитные цепи замыкаются измеряемой полосой и эталоном. Первичные обмотки электромагнитов питаются переменным током от генератора такой частоты, когда эффективная глубина проникновения вихревых токов больше, чем толщина измеряемой полосы. Во вторичных обмотках электромагнитов возникают напряжения, которые пропорциональны толщине измеряемого ферромагнитного основания биметалла и эталона. Вторичные обмотки соединены так, что их напряжения в схеме сравнения направлены навстречу одно другому. Так как напряжение, поступающее от вторичной обмотки эталонного электромагнита, постоянно, а напряжение от вторичной обмотки измерительного электромагнита, контролирующего толщину ферромагнитного слоя прокатываемой биметаллической полосы, меняется в зависимости от изменения этой толщины, то результирующее напряжение будет пропорционально отклонению толщины от заданной эталоном. Выпрямленный ток поступает на указатель отклонения толщины ферромагнитного слоя биметаллической полосы от заданной толщины.

С противоположной стороны биметаллической полосы и эталона располагают экранные измерительную и эталонную катушки, которые соединены последовательно-встречно и напряжения в схеме сравнения направлены навстречу одно другому. Синусоидальный ток, действующий в возбуждающих (первичных) обмотках электромагнитов, создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем верхнем слое биметаллической полосы. Эти вихревые токи затухают по мере проникновения вглубь исследуемого объекта. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на измерительную и эталонную катушки, наводя в них ЭДС, которые пропорциональны толщине измеряемого верхнего слоя биметалла и эталона. Напряжение эталонной катушки также постоянно, а напряжение измерительной катушки, контролирующей толщину верхнего слоя биметаллической полосы, меняется в зависимости от изменения этой толщины. Результирующее напряжение будет пропорционально отклонению толщины от заданной эталоном. Выпрямленный ток поступает на второй указатель отклонения толщины верхнего слоя прокатываемого биметалла от заданной толщины.

Кроме того, в работе проведена экспериментальная проверка разработанных методов, которая показала корректность теоретических положений, положенных в основу методов и их работоспособность.

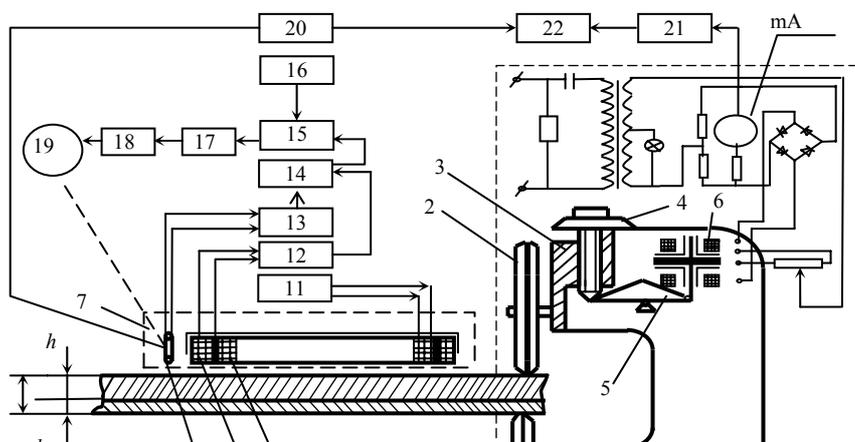
Таким образом, во второй главе показано, что разработанные методы по возможности автоматизации эксперимента, по быстрдействию и точности контроля показателей качества выгодно отличаются от существующих и дают возможность использовать их в системе автоматического регулирования толщины слоев биметаллов и для контроля сплошности соединения различных металлов и сплавов методом пластической деформации.

В **третьей главе** дано описание устройства оперативного непрерывного контроля толщины слоев биметаллов в технологическом процессе прокатки и описание ИИС, реализующей предложенные новые методы контроля соотношения толщин слоев и теплофизических свойств слоев биметаллов.

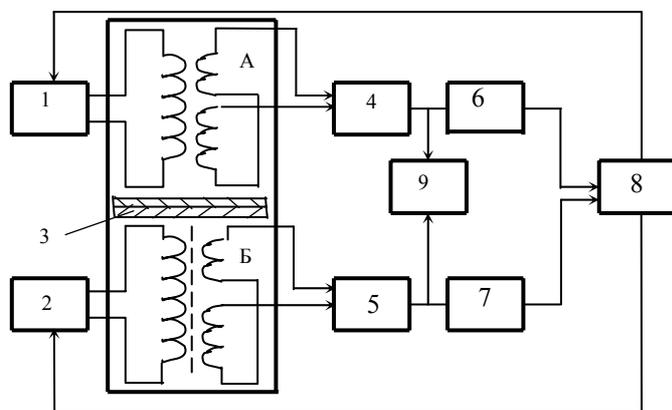
Устройство (рис. 4) содержит индуктивный микрометр 1, между двумя роликами 2 которого движется биметаллическая полоса, один из роликов укреплен на подвижном сухаре 3, опирающемся микрометрическим винтом 4 на конец рычага 5. Второй конец рычага соединен с якорем индуктивного дифференциального преобразователя 6. Установка нулевого положения датчика осуществляется вращением микрометрического винта 4. Обмотки датчика включены в схему моста с выпрямителем, собранным по кольцевой схеме. Сигнал об отклонении толщины движущейся биметаллической полосы через усилитель 21 подается на микропроцессор 22.

Вихретоковый преобразователь 7 жестко соединен с подвижным сухарем 3 индуктивного микрометра 1. В состав вихретокового преобразователя входят возбуждающая катушка 8, измерительные катушки 9 и 10, причем измерительная катушка 10 может перемещаться относительно измерительной катушки 9 над поверхностью движущейся биметаллической полосы. Возбуждающая катушка 8 соединена с генератором 11 переменного тока. Выходы измерительных катушек 9 и 10 подключены соответственно к входам согласующих устройств 12 и 13, выходы которых подключены к делителю 14. Выход делителя 14 подключен к блоку вычитания 15, на второй вход которого с блока 16 заданы отношения интенсивностей электромагнитного излучения подается сигнал, моделирующий величину заданного отношения электромагнитного излучения. Разностный сигнал с выхода вычитающего блока 15 через усилитель 17 и демодулятор 18 поступает на реверсивный двигатель 19, вал которого кинематически соединен с механизмом перемещения измерительной катушки 10 относительно второй катушки 9. Измерительная катушка 10 соединена также с преобразователем перемещения 20, выход которого подключен к микропроцессору.

ИИС (рис. 5) имеет два отдельных измерительных канала А и Б с двумя отдельными генераторами 1 и 2, демодуляторами 4 и 5, усилителями постоянного тока 6, 7. На выходе каждого канала выдается выпрямленное напряжение, пропорциональное результату измерения датчиками А и Б устройства непрерывного контроля соотношения толщин слоев биметалла 3. Эти выходные напряжения подаются в контрольно-управляющее микропроцессорное устройство 8. С выходов демодуляторов предусмотрена подача измерительных напряжений на самописец 9.



**Рис. 4 Устройство контроля соотношения слоев биметаллов**



**Рис. 5 Блок-схема информационно-измерительной системы**

Работа ИИС заключается в следующем. Взаимоиндуктивные датчики А и Б включены по дифференциальной трансформаторной схеме. Одна обмотка каждого датчика питается переменным напряжением постоянной величины, поступающим с генераторов 1 и 2. Частота питающих напряжений определяется толщиной, электрофизическими свойствами контролируемых слоев биметалла и геометрическими параметрами датчиков. За счет магнитной связи между обмотками во вторичных обмотках наводится ЭДС. Изменение измеряемого параметра приводит к изменению связи между обмотками и к изменению ЭДС на вторичных обмотках, которые включены последовательно-встречно.

На выходе датчиков будут действовать переменные напряжения пропорционально измеряемым толщинам слоев. Для выделения сигнала измерительной информации из промодулированного напряжения несущей частоты предназначены фазочувствительные демодуляторы 4 и 5. На выходе демодуляторов создается выпрямленное напряжение, пропорциональное по величине измеряемым толщинам слоев биметалла. Выпрямленные и усиленные усилителями постоянного тока 6 и 7 напряжения подаются на входы микропроцессора 8, где по градуировочным характеристикам определяются толщины слоев биметалла.

Максимальная погрешность измерения верхнего антифрикционного слоя не превышает 6 % в диапазоне толщин 0,5 – 1,0 мм.

В четвертой главе проведен анализ влияния различных компонент составляющих погрешностей на точность измерений толщины слоев биметаллов индуктивными измерительными устройствами. Показано, что для индуктивных измерительных датчиков в качестве основных являются погрешность от нелинейности характеристики и влияния температуры. Даны аналитические зависимости для расчета температурной погрешности.

Доказано, что одним из источников методической погрешности бесконтактных методов контроля теплофизических свойств и толщины слоев биметаллов является погрешность, обусловленная поглощением излучения промежуточной средой вследствие наличия в объеме между термоприемником и биметаллической полосой паров охлаждающей жидкости, поступающей на валки прокатного стана.

В пятой главе приведены результаты применения разработанных методов и средств неразрушающего контроля для интенсификации производства и повышения качества биметаллов. Дано описание модернизированной опоры валька прокатного стана и линии рулонного производства антифрикционного биметалла с разработанной ИИС непрерывного контроля толщины и ТФС слоев. Техничко-экономические преимущества рассмотренного технического решения обусловлены увеличением производительности рулонного производства биметалла почти в 2 раза, значительным расширением по толщине и ширине номенклатуры биметалла на основе сплава АО6-1, АО12-1, АО20-1, АО10-1 и существенным снижением разнотолщинности по длине и ширине биметаллической полосы.

Дано также описание автоматической системы контроля толщины вкладышей подшипников скольжения, позволяющей с использованием предложенных в работе методов бесконтактного контроля толщины слоев биметалла в едином технологическом цикле производства осуществлять непрерывный контроль толщины готовых вкладышей.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Разработаны новые методы неразрушающего контроля соотношения толщин слоев различных биметаллов и методы одновременного контроля толщины и теплофизических свойств слоев биметалла, проведена экспериментальная проверка методов контроля качества с целью определения тепловых режимов нагрева и измерения, которая показала корректность основных теоретических выводов, положенных в основу предложенных тепловых методов.

2 Для оперативного непрерывного контроля толщины слоев биметаллов в технологическом процессе прокатки разработаны и испытаны устройства, позволяющие непрерывно контролировать соотношение толщин слоев различных биметаллов.

3 Разработана информационно-измерительная система неразрушающего контроля, реализующая предложенные новые методы контроля соотношения толщин слоев и теплофизических свойств слоев биметаллов.

4 Использование предложенных в диссертационной работе методов неразрушающего контроля соотношения толщин слоев, теплофизических свойств слоев биметалла, модернизация опоры вала прокатного стана и линии рулонного производства биметалла позволили увеличить производительность рулонного производства биметалла почти в 2 раза, значительно расширить по толщине и ширине номенклатуру биметалла, существенно снизить разнотолщинность по длине и ширине биметаллической полосы, осуществлять непрерывный контроль сплошности соединения различных металлов и сплавов методом пластической деформации.

5 Разработана автоматическая система контроля толщины вкладышей подшипников скольжения, позволяющая с использованием предложенных в работе методов бесконтактного контроля толщины слоев биметалла в едином технологическом цикле производства осуществлять непрерывный контроль толщины готовых изделий.

#### **По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1 Плужников Ю. В., Колмаков А. В., Пудовкин А. П. Проектирование опоры прокатного стана // Информационные технологии при проектировании микропроцессорных систем: Тез. докл. Междунар. конф. Тамбов, 2000. С. 128 – 129.

2 Патент РФ 2172654, 7В 21 В 31/02. Опора прокатного вала / Ю. В. Плужников, А. В. Колмаков, А. П. Пудовкин и др. № 2000123971; Заявл. 18.09.2000; Оpubл. 27.08.2001, Бюл. № 24.

3 Пудовкин А. П., Плужников Ю. В., Колмаков А. В. Совершенствование опор прокатного стана для производства биметаллов // Вестник ТГТУ. 2001. Т. 7. № 4. С. 660 – 664.

4 Плужников Ю. В., Колмаков А. В., Пудовкин А. П. Интенсификация производства биметалла методом холодной прокатки // Труды ТГТУ: Сборник научных статей молодых ученых и студентов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. Вып. 10. С. 153 – 158.

5 Патент РФ 2182310, G 01 В 7/06. Способ бесконтактного неразрушающего контроля толщины и теплофизических свойств изделий / Ю. В. Плужников, А. В. Колмаков, А. П. Пудовкин. № 2001100142/28; Заявл. 03.01.2001; Оpubл. 10.05.2002, Бюл. № 13.

6 Плужников Ю. В., Колмаков А. В., Пудовкин А. П., Чернышов В. Н. Методы и измерительные системы контроля соотношения слоев биметаллов // Труды ТГТУ: Сборник научных статей молодых ученых и студентов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. Вып. 11. С. 206.

7 Патент РФ 2186869, 7С 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, Бюл. № 22.

8 Положительное решение на заявку № 2001105508/02 (005541). Линия рулонного производства биметалла / Ю. В. Плужников, А. В. Колмаков, А. П. Пудовкин и др. Принято 25.01.2002.

9 Метод и измерительная система непрерывного контроля соотношения слоев биметаллов / А. П. Пудовкин, В. Н. Чернышов, Ю. В. Плужников, А. В. Колмаков; Под общ. ред. В. С. Балакирева // Математические методы в технике и технологиях: Сб. трудов XV Международной научной конференции. В 10 т. Т. 7. Секция 7. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. С. 168 – 169.

10 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. 2002. Т. 8. № 2. С. 190 – 200.

11 Выбор параметров датчика для бесконтактных измерений толщины биметаллов методом вихревых токов / Ю. В. Плужников, А. В. Колмаков, А. П. Пудовкин, В. Н. Чернышов // VII научная конференция: Пленарные доклады и тезисы стендовых докладов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. Ч. 1. С. 99.