

## МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛОФТОРОПЛАСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.П. Пудовкин, В.Н. Чернышов

*Кафедра «Криминалистика и информатизация  
правовой деятельности», ТГТУ*

*Представлена членом редколлегии профессором В.Ф. Калинин*

**Ключевые слова и фразы:** биметаллическая полоса с ферромагнитным основанием; бронзовый каркас; металлофторопластовые материалы; пористость.

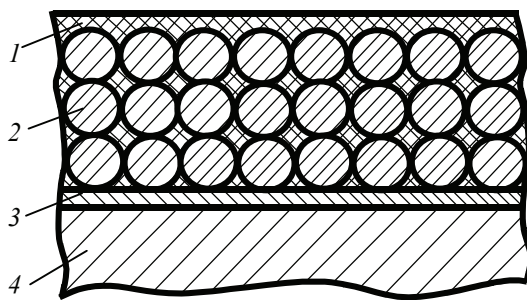
**Аннотация:** Приведены параметры технологии и схема поточной линии производства антифрикционных металлофторопластовых материалов. Описаны методы неразрушающего контроля качества металлофторопластовых материалов.

Подшипники скольжения, имея малые размеры, массу и т.п., в некоторых случаях обладают преимуществами по сравнению с подшипниками качения. Это относится к металлофторопластовым подшипникам скольжения, которые обладают высокими антифрикционными свойствами, позволяющими применять их в широком диапазоне температур ( $-200...300$  °С) и нагрузок в условиях сухого трения и в средах, не обладающих смазочными свойствами. Они отличаются высокой конструкционной стойкостью и успешно противостоят вибрационным нагрузкам. Эти качества металлофторопластовых подшипников позволяют широко применять их в многочисленных, в том числе в тяжело нагруженных и ответственных узлах трения машин и механизмов различных типов.

Поперечное сечение металлофторопластового ленточного материала показано на рис. 1. Его структуру можно представить состоящей из четырех слоев [1]. Первый слой условно называемый приработочным, состоит из фторопласта, наполненного мелкодисперсным дисульфидом молибдена. Содержание дисульфида молибдена по объему составляет 25 %. Обычно толщина приработочного слоя лежит в пределах  $0,01...0,04$  мм.

Второй, бронзофторопластовый слой, представляет собой как бы два вставленных один в другой губчатых слоя бронзы и наполненного фторопласта. Пористый металлический каркас образован спеканием сферических частиц высокооловянной бронзы.

Третий, меднооловянный слой, имеет толщину порядка  $0,015...0,02$  мм. Этот слой обеспечивает прочное сцепление бронзового пористого слоя



**Рис. 1** Разрез металлофторопластового ленточного материала:

1 – фторопласт; 2 – бронза; 3 – медь; 4 – сталь

со стальной основой, которая является четвертым слоем. Стальная основа образуется сталью Ст08, а ее толщина находится в пределах 1...4 мм.

Из таких ленточных материалов штампуют свернутые втулки, упорные кольца, сферические опоры и другие детали. Рабочая поверхность антифрикционного слоя не допускает механической обработки резанием, что является причиной повышенных требований к допускам на толщину производимой ленты и к точности операций штамповки.

На рис. 2 показана схема поточной линии производства металлофторопластовой ленты, состоящей из двух полуавтоматических линий. На первой линии напекают на предварительно медненую стальную ленту сферические частицы бронзы, образующие пористый слой; на второй линии поры этого слоя заполняются фторопластом-4 с наполнителем.

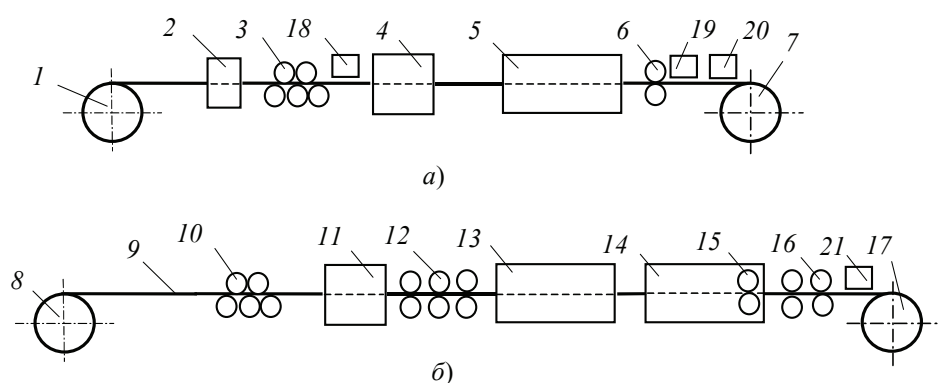
Первая линия (рис. 2, а) состоит из размоточного устройства 1, пневматических ножниц 2, правильных вальцов 3, агрегата 4 для промывки и очистки ленты, устройства для нанесения на ленту слоя бронзовых частиц, печи 5 для их спекания и припекания к ленте, тянущих вальцов 6, механизма намотки 7.

Вторая линия изображенная на рис 2, б, состоит из размоточного устройства 8, правильных вальцов 10, устройства 11 для нанесения на пористый бронзовый слой 9 пасты фторопласта-4 с дисульфидом молибдена, валков 12 для вкатывания пасты в пористый слой, печи 13 для сушки, печи 14 для спекания фторопласта, валков 15 для калибровки ленты, валков 16 для окончательного калибрования, механизма намотки 17.

Готовую металлофторопластовую ленту тщательно контролируют по следующим параметрам: микроструктуре, размерам, глубине вытяжки и двустороннему изгибу образцов на 90° в губках тисков с различными радиусами закругления. По микроструктуре ленты на поперечных шлифах не менее пяти образцов контролируют качество напекания бронзового слоя, пористость, равномерность толщины фторопластового поверхностного слоя и бронзового подслоя, заполнение пор фторопластом, равномерность распределения наполнителя во фторопласте. Все шлифы сравнивают с эталонными образцами.

Основной недостаток существующего метода контроля качества состоит в необходимости изготовления разрушающим методом шлифов образцов из каждой партии металлофторопластовых материалов.

Разработана методика неразрушающего контроля качества (толщины слоев, а также пористости бронзового каркаса) металлофторопластовой ленты в технологическом потоке ее изготовления, схема которой представлена на рис. 3.



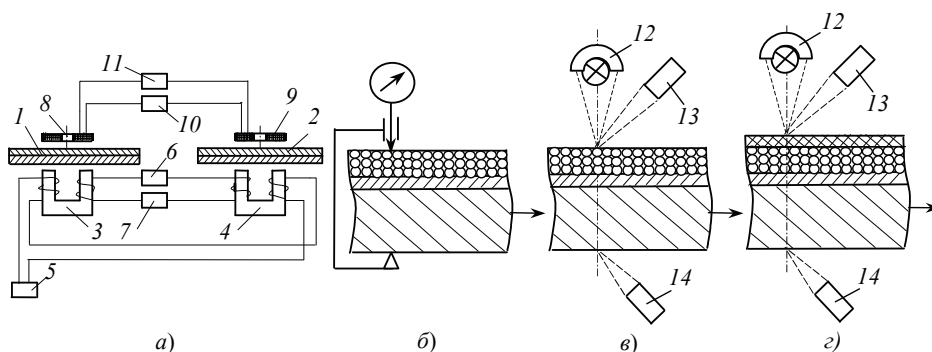
**Рис. 2** Схема поточной линии производства металлофторопластовой ленты:  
а – для нанесения слоя сферических частиц бронзы на медненую стальную ленту;  
б – для заполнения пор смесью фторопласта с дисульфидом молибдена

Для повышения точности измерения толщины слоев медной стальной ленты может быть использован метод непрерывного контроля толщины слоев биметалла с ферромагнитным основанием [2]. На рис. 3, а представлена схема устройства, реализующего данный метод.

Устройство состоит из биметаллической полосы 1, эталона 2, двух индукторов, один из которых измерительный 3, а другой – эталонный 4, соединенные с генератором 5 переменного тока, выпрямителей 6 и 10, указателей отклонения толщины 7 и 11, экранных измерительной 8 и эталонной 9 катушек.

Метод непрерывного контроля осуществляется следующим образом. Биметаллическая полоса 1 и эталон 2 намагничиваются с помощью П-образных электромагнитов 3 и 4 на фиксированной частоте генератором 5. Электромагниты установлены со стороны ферромагнитного слоя биметалла. В электромагните магнитная цепь замыкается измеряемой полосой, в эталонном – 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 толщинам измеряемого ферромагнитного основания биметалла и эталона. Вторичные обмотки соединены так, что их напряжения в схеме сравнения направлены навстречу друг другу. 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 7 отклонения толщины ферромагнитного слоя биметаллической полосы от заданной толщины.

Экранные измерительная 8 и эталонная 9 катушки расположены соответственно над измерительным электромагнитом 3 и эталонным электромагнитом 4 с противоположной стороны биметаллической полосы 1 и эталона 2. Катушки 8 и 9 соединены последовательно-встречно и напряжения в схеме сравнения направлены навстречу друг другу. Синусоидальный ток, действующий в возбуждающих (первичных) обмотках измерительного и эталонного электромагнитов, создает



**Рис. 3** Схема непрерывного контроля качества металлофторопластового ленточного материала в технологическом потоке ее изготовления:

- а* – контроль толщины слоев двухслойной биметаллической ленты; *б* – контроль толщины бронзового пористого каркаса после спекания сферических бронзовых частиц летучим микрометром; *в* – контроль пористости бронзового каркаса тепловым методом; *г* – контроль теплопроводности бронзового каркаса, заполненного фторопластом-4 с наполнителем и контроль толщины приработочного слоя

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 8 и эталонную 9 катушки, наводя в них ЭДС, которые пропорциональны толщинам 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 в выпрямителе 10 поступает на второй указатель 11 отклонения толщины верхнего слоя прокатываемого биметалла от заданной толщины.

Для непрерывного неразрушающего контроля пористости бронзового каркаса, а также толщины приработочного слоя металлофторопластовой ленты в технологическом потоке ее изготовления разработан метод, отличительной особенностью которого является бесконтактность измерения, оперативность и высокая производительность измерения, широкие функциональные возможности, возможность автоматизации процесса измерения. Сущность метода заключается в следующем. В бесконтактном тепловом методе неразрушающего контроля качества тепловое воздействие на объект измерения осуществляется от подвижного линейного источника тепловой энергии (сфокусированного на поверхность исследуемого изделия в виде полосы длиной 40...50 мм, шириной 4...6 мм). Кроме того, с противоположных сторон исследуемого изделия размещают два термодатчика, первый из которых сфокусирован на линию теплового воздействия источника тепловой энергии, а второй – на точку поверхности, расположенную с обратной стороны напротив линии теплового воздействия.

Алгоритм измерения осуществляется по схеме, представленной на рис. 3, в. С помощью движущегося линейного источника тепла 12 постоянной мощности нагревают поверхность исследуемого изделия и измеряют установившуюся избыточную температуру  $T_1$  в центре источника тепла первым термодатчиком 13 и температуру  $T_2$  вторым термодатчиком 14 на поверхности изделия в точке, расположенной с обратной стороны напротив линейного источника тепла.

Термическое сопротивление последовательно соединенных составных стенок, ориентированных перпендикулярно тепловому потоку, определяется по формуле [3]

$$R_i = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n [h_i / (\lambda_i S)], \quad (1)$$

где  $R_i$ ,  $h_i$ ,  $\lambda_i$  – термическое сопротивление, толщина и теплопроводность  $i$ -ой стенки соответственно;  $S = lb$  – площадь изотермической поверхности;  $l$ ,  $b$  – длина и ширина сфокусированного источника тепла соответственно.

Поскольку разность установившихся избыточных температур, обусловленная сопротивлением различных слоев при тепловом воздействии источником постоянной мощности, определяется в соответствии с зависимостью вида  $\Delta T = qR$ , то зависимость между температурами  $T_1$  и  $T_2$  и тепловым потоком для трехслойной системы (рис. 3, в), состоящей из стального основания, слоя меди и слоя пористого бронзового каркаса, с известными толщинами слоев будет иметь вид

$$T_1 - T_2 = \Delta T_1 = qR_1 = q \left( \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3}{\lambda_3} \right) \frac{1}{S}, \quad (2)$$

где  $h_1$ ,  $\lambda_1$  – толщина и теплопроводность нижнего слоя;  $h_2$ ,  $\lambda_2$  – толщина и теплопроводность второго слоя;  $h_3$  – толщина бронзового каркаса, измеренная летучим

микрометром (рис. 3, б);  $S$  – площадь участка активного теплового воздействия;  $q$  – мощность теплового потока.

Тогда теплопроводность пористого бронзового каркаса определяется как

$$\bar{\lambda}_3 = \frac{h_3}{\frac{S\Delta T}{q} - \left(\frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2}\right)}. \quad (3)$$

Известно также [4], что теплопроводность пористого металлического каркаса связана с пористостью следующей зависимостью

$$\bar{\lambda}_3 = \lambda_k(1 - 1,5\Pi), \quad (4)$$

где  $\lambda_k$  – теплопроводность материала каркаса в компактном состоянии;  $\Pi = \frac{V_{\text{п}}}{V}$  – пористость бронзового каркаса;  $V_{\text{п}}$  – объем, занимаемый порами;  $V$  – объем пористого материала.

Тогда из формулы (4) можно определить пористость бронзового каркаса

$$\Pi = \frac{\lambda_k - \bar{\lambda}_3}{1,5\lambda_k}. \quad (5)$$

Для четырехслойной системы (рис. 3, з), состоящей из стального основания, слоя меди, слоя пористого бронзового каркаса, поры которого заполнены фторопластом-4 с наполнителем дисульфидом молибдена, зависимость (1) будет выглядеть следующим образом

$$T_1 - T_3 = \Delta T_2 = qR_2 = q \left( \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3}{\bar{\lambda}_4} + \frac{h_4}{\lambda_{\text{ф}}} \right) \frac{1}{S}, \quad (6)$$

где  $T_1$  и  $T_3$  – новые значения установившихся избыточных температур в точках контроля;  $h_3$  – толщина бронзового каркаса, заполненного фторопластом-4 с наполнителем;  $\bar{\lambda}_4$  – среднеинтегральная теплопроводность двухкомпонентной системы, состоящей из бронзового пористого каркаса и фторопласта-4 с наполнителем;  $h_4$  – толщина прирабочного фторопластового слоя;  $\lambda_{\text{ф}}$  – теплопроводность материала прирабочного слоя.

Известно [5], что измеряемая среднеинтегральная по объему теплопроводность  $\bar{\lambda}_4$  двухкомпонентной системы определяется выражением

$$\bar{\lambda}_4 = m_1\lambda_{\text{ф}} + m_2\lambda_{\text{бр}}, \quad (7)$$

где  $\lambda_{\text{бр}} = \bar{\lambda}_3 = \lambda_k(1 - 1,5\Pi)$  – теплопроводность бронзового пористого каркаса;

$m_1 = \frac{m_{\text{ф}}}{m_{\text{ф}} + m_{\text{к}}}$ ;  $m_2 = \frac{m_{\text{к}}}{m_{\text{ф}} + m_{\text{к}}}$ ;  $m_{\text{ф}}$ ,  $m_{\text{к}}$  – масса фторопласта-4 с наполнителем и

масса бронзового каркаса в единице объема двухкомпонентной системы соответственно.

Так как  $m_{\text{ф}} = \rho_{\text{ф}}V_{\text{ф}} = \rho_{\text{ф}}Sh_4$ ,  $m_{\text{к}} = \rho_{\text{бр}}V_{\text{бр}} = \rho_{\text{бр}}(1 - \Pi) = \rho_{\text{бр}}Sh_4(1 - \Pi)$ , где  $\rho_{\text{бр}}$ ,  $\rho_{\text{ф}}$  – плотность фторопласта-4 с наполнителем и бронзы в компактном состоянии соответственно;  $V$  – объем двухкомпонентной системы, подверженный тепловому воздействию, то

$$m_1 = \frac{\rho_{\phi}}{\rho_{\phi} + \rho_{\text{бр}}(1 - \Pi)}; \quad m_2 = \frac{\rho_{\text{бр}}(1 - \Pi)}{\rho_{\phi} + \rho_{\text{бр}}(1 - \Pi)}. \quad (8)$$

После подстановки выражения (8) в (7) получим формулу для определения среднеинтегральной по объему теплопроводности

$$\bar{\lambda}_4 = \frac{\rho_{\phi}\lambda_{\phi} + \rho_{\text{бр}}(1 - \Pi)(1 - 1,5\Pi)\lambda_{\kappa}}{\rho_{\phi} + \rho_{\text{бр}}(1 - \Pi)}. \quad (9)$$

Подставив полученное выражение (9) в (6), получим формулу для определения толщины прирабочного слоя

$$h_4 = \frac{\Delta T_3 S}{q} \left\{ \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \frac{h_3 [\rho_{\phi} + \rho_{\text{бр}}(1 - \Pi)]}{\rho_{\phi}\lambda_{\phi} + \rho_{\text{бр}}(1 - \Pi)(1 - 1,5\Pi)\lambda_{\kappa}} \right\}. \quad (10)$$

Таким образом, используя схему измерения (см. рис. 3) можно оперативно и без нарушения целостности определить толщину всех четырех слоев и пористость бронзового каркаса металлофторопластового ленточного материала в технологическом процессе производства.

#### *Список литературы*

1. Семенов А.П. Металлофторопластовые подшипники / А.П. Семенов, Ю.Э. Савинский. – М.: Машиностроение, 1976. – 192 с.
2. С1 2210058 RU G 01 В 7/06, G 01 N 27/90. Способ непрерывного контроля толщины слоев биметалла с ферромагнитным основанием / Ю.В. Плужников, А.В. Колмаков, А.П. Пудовкин, В.Н. Чернышов. – № 2002102151/28(001924); Заявл. 23.01.2002 // Изобретения (Заявки и патенты). – 2003. – № 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. – 2002. – Т. 8. – № 2. – С. 190-200.
4. Пористые проницаемые материалы: Справ. изд. / Под ред. Белова С.М. – М.: Металлургия, 1987. – 335 с.
5. Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н. Дульнев. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

### **Method of Non-Destructive Control over Quality of Metal Fluoroplastic Materials**

**A.P. Pudovkin, V.N. Chernyshov**

*Department "Criminal Law and Legal Activity Computerization", TSTU*

**Key words and phrases:** bimetal line with ferromagnetic base; metal fluoroplastic materials; porosity; bronze framework.

**Abstract:** Parameters of technology and the scheme of production line of anti-friction metal fluoroplastic materials are given. Methods of non-destructive control over quality of metal fluoroplastic materials are described.

## **Methode der ungebrochenen Kontrolle der Qualität von Metallfluorkunststoffen**

**Zusammenfassung:** Es sind die Technologieparameter und das Schema der Fließstraße der Produktion von Gleitmetallfluorkunststoffen angeführt. Es sind die Methoden der ungebrochenen Kontrolle der Qualität von Metallfluorkunststoffen beschrieben.

---

## **Méthode du contrôle non-destructif de la qualité des matériaux métalliques de plastique fluoré**

**Résumé:** Sont cités les paramètres de la technologie et le schéma de la chaîne de fabrication des matériaux métalliques de plastique fluoré antifricition. Est décrite la méthode du contrôle non-destructif de la qualité des matériaux métalliques de plastique fluoré.

---