

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
МАССОПРОВОДНОСТИ РАСТВОРИТЕЛЕЙ
В ТОНКИХ ИЗДЕЛИЯХ ИЗ КАПИЛЛЯРНО-
ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В.П. Беляев, С.В. Мищенко, П.С. Беляев

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор С.В. Пономарев

Ключевые слова и фразы: автоматизированная система контроля; гальванический датчик содержания растворителя в твердой фазе; измерительное устройство; капиллярно-пористый материал; коэффициент диффузии; метрологический анализ; неразрушающий контроль; растворитель; электродвижущая сила.

Аннотация: Рассматриваются вопросы оптимизации устройства для определения коэффициента диффузии растворителей в тонких изделиях из капиллярно-пористых материалов с точки зрения обеспечения наивысшей точности и производительности метода неразрушающего контроля и разрабатываемого для его реализации устройства.

Разработка экспресс-методов и устройств для определения коэффициента диффузии растворителей в тонких изделиях из капиллярно-пористых материалов играет важную роль при организации и совершенствовании технологических процессов производства соответствующей продукции, например, различных сортов бумаги, тканей, и позволяет получать оперативную информацию о качестве получаемой продукции и перспективах ее применения.

Нами использовался представленный в [1] экспресс-метод неразрушающего контроля коэффициента диффузии полярных растворителей в тонких изделиях из капиллярно-пористых материалов. Данный метод по-

Беляев Вадим Павлович – магистрант кафедры «Управление качеством и сертификация»; Мищенко Сергей Владимирович – доктор технических наук, профессор, ректор ТамбГТУ, научный руководитель кафедры «Управление качеством и сертификация»; Беляев Павел Серафимович – доктор технических наук, профессор кафедры «Переработка полимеров и упаковочное производство», проректор по учебно-инновационной деятельности, e-mail: polymers@asp.tstu.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов.

зволяет, не нарушая целостность изделия, на основании полученной информации об изменении во времени электродвижущей силы (ЭДС) гальванических преобразователей (ГП) [2], без предварительного нахождения реальных изменений концентрации растворителей в твердой фазе, определить искомую характеристику по формуле

$$D = r_0^2 / (4\tau_{\max}),$$

где τ_{\max} – время, соответствующее максимуму на кривой $E(r_0, \tau)$ изменения ЭДС ГП на расстоянии r_0 от точечного импульсного источника массы растворителя.

В данной работе рассматривается задача оптимизации устройства для реализации данного метода с точки зрения обеспечения наивысшей точности и производительности контроля. Наибольший интерес разработанный метод вызвал у предприятий, занимающихся производством, переработкой и использованием различных сортов бумаги и ряда тканей для резиновой промышленности. Поэтому диапазон изменения искомого коэффициента диффузии растворителей был определен в пределах $(0,5 \dots 5) \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$.

В процессе исследования чувствительности предлагаемого способа определения коэффициента диффузии растворителей в тонких изделиях из капиллярно-пористых материалов методами имитационного моделирования, а также в результате натурных испытаний различных материалов было установлено, что для уменьшения длительности единичного экспериментального исследования, с целью обеспечения максимальной производительности контроля, необходимо датчик концентрации располагать как можно ближе к импульсному источнику исследуемой жидкости. При этом, однако, возрастает величина относительной погрешности определения координаты расположения датчика [1].

В процессе исследований было установлено, что при заданной величине абсолютной погрешности ΔE измерения ЭДС ГП, чем дальше от источника массы растворителя находится гальванический преобразователь, тем меньшее значение достигает максимум на кривой изменения его ЭДС и тем выше относительная погрешность определения ЭДС ГП. При этом возрастает длительность проведения эксперимента и абсолютная погрешность определения момента времени, соответствующего максимуму на кривой изменения ЭДС ГП.

С другой стороны, при высоких значениях искомого коэффициента на близко расположенных к источнику массы датчиках концентрации невозможно определить максимум на кривой изменения ЭДС, так как ГП теряет свои информативные свойства вследствие того, что максимум на кривой изменения концентрации находится в области свободного (несвязанного с дисперсной средой) состояния растворителя [2].

Из проведенного нами анализа суммарного значения относительной погрешности определения коэффициента диффузии следует, что для обеспечения измерений искомой характеристики в области нижнего предела диапазона предлагаемого метода и устройства расстояние от датчика концентрации до источника массы должно быть порядка 1,5 мм, при этом

теоретическое значение среднеквадратической оценки относительной погрешности определения коэффициента диффузии составляет величину порядка 13,4 %. В области верхнего предела рассматриваемого диапазона изменения искомой характеристики расстояние от датчика до источника массы не должно превышать 5 мм, при этом теоретическое значение среднеквадратической оценки относительной погрешности определения коэффициента диффузии составляет величину порядка 11,8 %.

Исходя из результатов анализа математической модели массопереноса, реализуемого в измерительном устройстве, и метрологического анализа были выбраны минимальные размеры плоского участка изделий из листовых капиллярно-пористых материалов и их максимальная толщина: на нижнем пределе измерения коэффициента диффузии – соответственно диаметр не менее 30 мм и толщина не более 0,15 мм; на верхнем пределе – 100 и 0,5 мм соответственно.

На основании изложенного было спроектировано измерительное устройство в виде выносного зонда, имеющего сквозное отверстие, в котором размещается трубопровод подачи импульса массы растворителя в виде иглы шприца. На поверхности зонда, обращенного к исследуемому листовому материалу, на концентрических окружностях относительно отверстия для нанесения импульсного воздействия, размещены электроды гальванических преобразователей. Эти окружности имеют различный диаметр от 1,5 до 5 мм.

В целях повышения оперативности и эффективности исследований коэффициента диффузии растворителей в анализируемых листовых капиллярно-пористых материалах была разработана и изготовлена автоматизированная система неразрушающего контроля (АСНК), которая обеспечивает автоматизированное проведение эксперимента, измерение и регистрацию в режиме реального времени необходимой экспериментальной информации и расчет по разработанным алгоритмам искомой характеристики [3]. АСНК включает в свой состав: измерительный зонд, укомплектованный источником массы растворителя и электродами гальванических преобразователей локальной концентрации растворителей в исследуемом листовом капиллярно-пористом материале; многофункциональную плату сбора данных PCI-1202H фирмы ISP DAS (Тайвань); персональный компьютер.

В разработанной АСНК аналоговый мультимплексор подключает к усилителю платы PCI-1202H поочередно один из пяти гальванических датчиков измерительного зонда. С помощью аналого-цифрового преобразователя получают цифровые эквиваленты входных сигналов, которые сглаживаются, фильтруются и подвергаются обработке в соответствии с разработанным алгоритмом. Программа управления экспериментом, обработки экспериментальных данных и их визуализации разработана в среде LabView 9.0 и защищена свидетельством об официальной регистрации программы для ЭВМ [4].

Для проведения эксперимента исследуемый материал с заданным начальным распределением растворителя располагался на плоской подложке, выполненной из фторопласта. На поверхности исследуемого материала размещался измерительный зонд. Осуществлялась подача заданной дозы

Коэффициент диффузии ацетона в хлопковой ткани ($r_0 = 1,5 \cdot 10^{-3}$, м)

№ опыта	Время достижения максимума кривой $E(r, \tau)$, с	Коэффициент диффузии $D_i \cdot 10^{10}$, м ² /с	Математическое ожидание $\bar{D} \cdot 10^{10}$, м ² /с	Абсолютная погрешность измерения $\Delta D = (D_i - \bar{D}) \cdot 10^{10}$, м ² /с	$\Delta D_i^2 \cdot 10^{20}$, м ⁴ /с ²	Относительная погрешность измерения, %
8	1152,7	4,88		-1,36	1,8496	6,5
9	868,1	6,48		+0,24	0,0576	
10	768,4	7,32	6,24	+1,08	1,1664	
11	817,6	6,88		+0,64	0,4096	
12	884,4	6,36		+0,12	0,0144	

растворителя в виде импульса и проводилась активная часть исследования. После подачи импульса массы разработанная нами автоматизированная система контроля последовательно опрашивает гальванические датчики, расположенные на различных расстояниях от центра импульса, фиксируя генерируемую ими ЭДС $E(r_1, \tau)$, $E(r_2, \tau)$, ..., $E(r_n, \tau)$. Автоматизированная система неразрушающего контроля автоматически игнорирует показания датчиков, ЭДС которых достигает критического значения, соответствующего переходу растворителя в область свободного состояния [3]. В дальнейшем система автоматически выбирает датчик, наиболее близкий к источнику массы, ЭДС которого не достигает критического значения. Фиксируется момент времени τ_{\max} , соответствующий максимуму на кривой изменения ЭДС данного датчика. На основании полученного значения τ_{\max} определяется искомое значение коэффициента диффузии.

Проведенные экспериментальные исследования ряда материалов: различных видов ткани, бумаги показали, что погрешность определения коэффициента диффузии растворителей не превышает 10 % при доверительной вероятности 0,95. Длительность эксперимента не превышает 20 мин. В качестве примера представлен фрагмент таблицы результатов определения коэффициента диффузии ацетона в хлопковой ткани (общее количество исследований по каждой системе капиллярно-пористый материал – растворитель составляет не менее 20 опытов).

Таким образом, можно сделать вывод, что величина случайной погрешности определения коэффициента диффузии растворителей в тонких капиллярно-пористых материалах не превышает значений оценок, полученных теоретически на основе математических моделей. Это свидетельствует о работоспособности предлагаемого метода и разработанной для его реализации автоматизированной системы неразрушающего контроля, укомплектованной оптимальным с точки зрения точности и быстродействия измерительным устройством в виде выносного зонда.

Список литературы

1. Беляев, М.П. Неразрушающий экспресс-контроль коэффициента диффузии полярных растворителей в тонких изделиях / М.П. Беляев, В.П. Беляев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – Тамбов, 2008. – Т. 14, № 1. – С. 41–47.

2. Effective Diffusion Coefficient of Active Solvents in Composite Polymeric Materials / S.V. Mishchenko [et al.] // *Drying Technology*. – 1999. – V. 17, № 10. – P. 2151–2167.

3. Беляев, М.П. Автоматизированная система неразрушающего контроля коэффициента диффузии растворителей в тонких изделиях из капиллярно – пористых материалов / М.П. Беляев, В.П. Беляев, А.Г. Дивин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – Тамбов, 2010. – Т. 16, № 4. – С. 797–802.

4. Свидетельство № 2011613240 об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для управления экспериментом и расчета коэффициента диффузии в тонколистовых капиллярно-пористых материалах / Беляев М.П., Беляев В.П., Дивин А.Г. ; Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2011611379 ; заявл. 02.03.2011 ; зарег. 26.04.2011.

**Optimization of Design and Technology Solutions
for the Implementation of Non-Destructive Testing
of Heat Conductivity of Solvents in Thin Products
from Capillary-Porous Materials**

V.P. Belyaev, S.V. Mishchenko, P.S. Belyaev

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: automated control system; capillary-porous material; diffusion coefficient; electromotive force; galvanic probe of solvent content in solid phase; measuring device; metrological analysis; nondestructive testing; solvent.

Abstract: The paper explores the matters of optimizing the device to determine the diffusion coefficient of solvents in thin products from capillary-porous materials in terms of ensuring the highest accuracy and performance of nondestructive testing method, and the device developed for its implementation.

© В.П. Беляев, С.В. Мищенко, П.С. Беляев, 2012