



УДК 519.248:004.93

Анализ двухкомпонентных композиционных покрытий при производстве элементов электроники с использованием методов компьютерного зрения

М. В. Ненашев, О. С. Рахманин, В. В. Киященко

Самарский государственный технический университет,
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Аннотация

Представлен метод анализа двухкомпонентных композиционных покрытий при производстве элементов электроники, основанный на системе математически обоснованных алгоритмов обработки изображений. Метод позволяет определять удельную поверхность, общую площадь материала и границы контакта, обеспечивая высокую точность и стабильность результатов. Полученные результаты могут быть успешно внедрены в промышленные процессы для оценки качества материалов и контроля производства. В рамках работы создана информационно-измерительная система обработки изображений, минимизирующая накопление ошибок на каждом этапе и обеспечивающая высокую точность определения характеристик материалов. Представлены примеры успешного применения метода, подчеркивающие его эффективность и перспективы в различных областях, включая промышленное производство элементов электроники. Полученные результаты представляют собой основу для дальнейших исследований и усовершенствования методов анализа композиционных материалов.

Ключевые слова: композиционные покрытия, анализ изображений, удельная поверхность, контроль производства элементов электроники.

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
Краткое сообщение

© Коллектив авторов, 2024

© СамГТУ, 2024 (составление, дизайн, макет)

 Контент публикуется на условиях лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

Образец для цитирования

Ненашев М. В., Рахманин О. С., Киященко В. В. Анализ двухкомпонентных композиционных покрытий при производстве элементов электроники с использованием методов компьютерного зрения // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2024. Т. 28, № 1. С. 186–198. EDN: GGGJQTI. DOI: [10.14498/vsgtu2068](https://doi.org/10.14498/vsgtu2068).

Сведения об авторах

Максим Владимирович Ненашев  <https://orcid.org/0000-0003-3918-5340>

доктор технических наук, профессор; первый проректор-проректор по научной работе; ректорат; e-mail: nenashev.mv@samgtu.ru

Олег Сергеевич Рахманин  <https://orcid.org/0000-0001-7337-268X>

кандидат технических наук, доцент; начальник лаборатории; лаб. цифровых двойников материалов и технологических процессов их обработки; e-mail: rakhmanin.os@samgtu.ru

Виктория Витальевна Киященко   <https://orcid.org/0000-0001-9710-2860>

аспирант; младший научный сотрудник; лаб. цифровых двойников материалов и технологических процессов их обработки; e-mail: vv.kiyashchenko@gmail.com

Получение: 15 декабря 2023 г. / Исправление: 18 января 2024 г. /
 Принятие: 29 января 2024 г. / Публикация онлайн: 18 марта 2024 г.

Введение

В последние десятилетия в условиях технологического прогресса возникает потребность в применении двухкомпонентных композиционных покрытий, состоящих из полиамидной смолы и отверждающего агента (функционального наполнителя), полученных методом распыления [1]. Такие покрытия используются в электронике для производства гибких печатных плат, для отвода тепла с экранов электрооборудования и в качестве защитных слоев, предотвращающих окисление, коррозию и воздействие влаги на электронные компоненты. При этом используемые образцы подвергаются резке тестовых пластин, последующей запрессовке в эпоксидный компаунд и шлифовке на шлифовальной машине групповой подготовки [2, 3]. Естественно, в рамках существующих технологий производства важным аспектом становится анализ получаемых покрытий [4–6], где обеспечение высокого уровня продукции становится ключевой задачей, в частности для производства электроники.

Существующие исследования посвященные анализу покрытий имеют своей целью создание объективных метрик качества. Однако многие из них сталкиваются с ограничениями в точности и надежности, особенно в условиях производства [7–9]. В этом контексте систематизация исследований и разработка методов контроля представляют собой одну из критически важных задач.

В настоящей работе предлагается новый подход для анализа двухкомпонентных композиционных покрытий, основанный на методах обработки изображений [10]. Данный подход, по мнению авторов, предоставляет дополнительный инструментарий для контроля качества двухкомпонентных композиционных покрытий.

1. Предварительная обработка изображения

Изображение представляется в виде матрицы пикселей, где каждый пиксель содержит информацию о цвете (или яркости, в случае оттенков серого). Пусть

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \dots & I_{1N} \\ I_{21} & I_{22} & \dots & I_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{M1} & I_{M2} & \dots & I_{MN} \end{bmatrix}$$

— матрица изображения размером $M \times N$, где M — количество строк, а N — количество столбцов. Каждый элемент I_{ij} матрицы представляет собой яркость (или цвет) соответствующего пикселя.

Формально, если изображение в оттенках серого, каждый элемент матрицы $\mathbf{I}$ будет являться числом в диапазоне от 0 (черный) до 255 (белый). Если изображение цветное, то каждый пиксель может быть представлен тройкой значений интенсивности красного (R), зеленого (G) и синего (B) цветов.

После загрузки изображения в матрицу пикселей определяется его цветовой тип. Если изображение в оттенках серого, то оно монохромное, иначе —

цветное. Пусть $\mathbf{C}$ — цветовая информация о пикселях изображения, представляющая собой матрицу цвета размером $M \times N$, где M — количество строк, а N — количество столбцов. Если изображение цветное, то каждый элемент матрицы C_{ij} будет представлен тройкой значений, соответствующих интенсивности красного (R), зеленого (G) и синего (B) цветов:

$$C_{ij} = (R_{ij}, G_{ij}, B_{ij}),$$

где R_{ij} , G_{ij} , B_{ij} — интенсивности красного, зеленого и синего цветов соответственно для пикселя в i -той строке и j -том столбце матрицы.

Если изображение в оттенках серого, то $\mathbf{C}$ будет матрицей одноканально-го изображения, где каждый элемент C_{ij} представляет яркость соответствующего пикселя.

Разрешение изображения определяется величиной, которая представляет количество пикселей на единицу длины (обычно на дюйм или миллиметр). Пусть r — это разрешение изображения. Тогда разрешение изображения может быть определено с использованием формулы

$$r = \frac{M}{h} \frac{N}{w},$$

где h и w — высота и ширина изображения в выбранных единицах длины (дюймы, миллиметры и т.д.).

Разрешение изображения представляет собой важный параметр, который описывает, насколько детализировано изображение и какое количество информации оно может содержать на единицу длины.

2. Бинаризация изображения

2.1. Применение метода Оцу для определения порога бинаризации. Метод Оцу — это алгоритм автоматического выбора порога бинаризации изображения. Он использует статистические свойства пикселей изображения для определения порога, максимизирующего разделение объектов и фона.

Первым шагом алгоритма является поиск функции распределения интенсивностей пикселей матрицы цвета $M \times N$. Функция распределения может быть задана в виде таблицы, она представляет собой закон распределения частот появления различных интенсивностей в изображении:

$$g(k) = \frac{100 n_k}{MN}, \quad (1)$$

где k принимает значения от 0 до 255 (для изображения в оттенках серого); n_k — количество пикселей с интенсивностью k .

Рассмотрим следующие величины: $v(k)$ — вес класса для пикселей с интенсивностью k ; $v_1(k)$ — вес класса фона, $v_2(k)$ — вес класса объекта:

$$v_1(k) = \sum_{q=0}^k g(q), \quad v_2(k) = \sum_{q=k+1}^{255} g(q).$$

Средние значения интенсивности для фона и объекта обозначим через $m_1(k)$ и $m_2(k)$ соответственно:

$$m_1(k) = \frac{1}{v_1(k)} \sum_{q=0}^k qg(q), \quad m_2(k) = \frac{1}{v_2(k)} \sum_{q=k+1}^{255} qg(q).$$

Межклассовая дисперсия σ_B^2 является мерой того, насколько объект и фон различаются:

$$\sigma_B^2(k) = v_1(k)v_2(k)[m_1(k) - m_2(k)]^2.$$

Порог бинаризации k_T определяется как значение k , при котором $\sigma_B^2(k)$ максимально:

$$k_T = \operatorname{argmax} \sigma_B^2(k),$$

где argmax — оператор, который возвращает максимальное значение аргумента для исследуемой функции.

Применение метода Оцу к изображениям композиционных покрытий позволяет определить порог бинаризации, максимизируя различие между объектом и фоном на изображении.

2.2. Получение бинарного изображения. После определения порога бинаризации на предыдущем шаге с использованием метода Оцу можно преобразовать изображение в бинарное, разделяя его на объекты и фон. Предположим, что порог бинаризации равен k_T . Бинарное изображение D размером $M \times N$ может быть получено попиксельно:

$$D_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } I_{ij} > k_T, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где D_{ij} — значение пикселя в бинарном изображении в позиции (i, j) ; I_{ij} — значение интенсивности пикселя в исходном изображении в позиции (i, j) ; k_T — порог бинаризации.

Таким образом, каждый пиксель в бинарном изображении становится равным 1, если значение интенсивности в соответствующем пикселе исходного изображения превышает порог бинаризации, и равным 0 в противном случае. Этот процесс разделения изображения на два класса (фон и объект) позволяет легко выделять интересные объекты на изображении.

2.3. Выделение контуров. После получения бинарного изображения применяется алгоритм поиска контуров для выделения границ объектов на изображении. Пусть $\mathcal{O}$ — множество контуров на изображении; контур — последовательность связанных пикселей, образующих границу объекта.

Алгоритм поиска контуров можно представить следующим образом:

- *поиск первого пикселя*: пусть P_f — первый пиксель, равный 1; через $\mathcal{O}_c$ обозначим текущий контур;
- *следование по контуру*: начиная с пикселя P_f алгоритм следует по контуру объекта; пусть P_c — текущий пиксель в контуре, а P_n — следующий пиксель в контуре; операция продолжается до тех пор, пока не будет достигнут пиксель P_f и контур замкнется;
- *добавление контура*: когда контур замкнут, он добавляется в множество контуров $\mathcal{O}$, обозначим его как $\mathcal{O}_d$, где d — номер контура.

Математический аппарат этого процесса несколько абстрактен, поскольку алгоритм поиска контуров обычно реализуется с использованием итераций и условий на основе связности пикселей. Однако можно представить это следующим образом. Начиная с координаты первого пикселя P_f контура $\mathcal{O}_d$ алгоритм проходит по пикселям, соседствующим с P_f , и добавляет их в контур, пока не вернется к P_f . Это можно представить следующим образом:

$$\mathcal{O}_d = \{P_1, P_2, \dots, P_n\},$$

где n — количество пикселей в контуре, P_i — координаты i -того пикселя в контуре.

Таким образом, алгоритм поиска контуров позволяет представить границы объектов на бинарном изображении в виде множества контуров.

3. Измерение параметров

3.1. Расчет общей площади. После выделения контуров на бинарном изображении можно рассчитать общую площадь объекта. Пусть $\mathcal{O}_d$ — контур объекта, представленный множеством координат пикселей контура:

$$\mathcal{O}_d = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}.$$

Предположим, что контур $\mathcal{O}_d$ формирует замкнутый многоугольник. Площадь многоугольника можно вычислить, используя формулу

$$A_d = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n-1} (x_k y_{k+1} - x_{k+1} y_k) + \frac{1}{2} (x_n y_1 - x_1 y_n),$$

где A_d — площадь многоугольника, ограниченного контуром $\mathcal{O}_d$; (x_k, y_k) — координаты k -той вершины контура. Эта формула основана на методе Гаусса для вычисления площади многоугольника, который использует координаты вершин. Важно отметить, что знаки учитываются таким образом, чтобы учесть направление обхода контура.

Таким образом, расчет площади объекта может быть выполнен путем суммирования площадей всех контуров:

$$A_{obj} = \sum_{d=1}^e A_d,$$

где A_{obj} — площадь объекта, представленного совокупностью контуров $\mathcal{O}_d$; e — количество контуров, выделенных на бинарном изображении.

Этот шаг позволяет количественно оценить площадь объекта на изображении на основе анализа его границ.

Если же возникает необходимость оценки площади всей анализируемой поверхности материала без выделения отдельных объектов, то общая площадь материала A_{total} может быть выражена так:

$$A_{total} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M D_{ij}.$$

3.2. Расчет площади темного материала. На данном этапе рассматриваются пиксели, соответствующие темному материалу, который согласно предыдущему контексту может быть полиамидной смолой. Обозначим бинарное изображение после пороговой бинаризации, где пиксели темного материала выделены, как B_{dark} .

Представим бинарное изображение D_{dark} в виде матрицы, в которой каждый элемент B_{ij} принимает значение 1, если соответствующий пиксель является темным, и 0 — в противном случае:

$$D_{dark} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1M} \\ B_{21} & B_{22} & \dots & B_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{N1} & B_{N2} & \dots & B_{NM} \end{bmatrix}.$$

Тогда площадь темного материала A_{dark} может быть выражена как сумма значений всех пикселей, соответствующих темному материалу:

$$A_{dark} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M b_{ij}.$$

3.3. Расчет площади светлого материала. Аналогично предыдущему этапу рассматриваются пиксели, соответствующие светлomu материалу, который в случае полиимидных покрытий может быть отверждающим агентом.

Площадь светлого материала A_{light} может быть выражена как разность значений общей площади и площади темного материала:

$$A_{light} = A_{total} - A_{dark}.$$

3.4. Расчет длины границы контакта. Для расчета длины границы контакта двух веществ представим бинарное изображение контуров в виде матрицы Z , в которой каждый элемент Z_{ij} принимает значение 1, если соответствующий пиксель является частью контура, и 0 — в противном случае:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1M} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NM} \end{bmatrix}.$$

Тогда длина границы контакта L_{cont} может быть определена как сумма длин всех контуров на изображении:

$$L_{cont} = \sum_{c=1}^e L_c,$$

где L_c — длина контура c , e — общее числа контуров.

С использованием полярной системы координат длина каждого контура L_c может быть вычислена с помощью формулы

$$L_c = \int_0^{2\pi} \sqrt{(dx/d\theta)^2 + (dy/d\theta)^2} d\theta,$$

где $x = r(\theta) \cos \theta$, $y = r(\theta) \sin \theta$.

В контексте нашей задачи полярные координаты (r, θ) позволяют описать форму контура с помощью углов и радиусов, что удобнее, чем использование прямоугольных координат (x, y) , особенно для криволинейных контуров. Угол θ определяет направление от начальной точки до каждой последующей точки на контуре. Параметризация по углу θ позволяет нам «идти вокруг» контура и измерять его длину относительно изменения угла.

Для дискретного представления интеграла применим метод конечных разностей:

$$L_c \approx \sum_{c=1}^Y \sqrt{\left(\frac{x(\theta_c + \Delta\theta) - x(\theta_c)}{\Delta\theta}\right)^2 + \left(\frac{y(\theta_c + \Delta\theta) - y(\theta_c)}{\Delta\theta}\right)^2} \Delta\theta,$$

где Y — количество дискретных точек на контуре, а $\Delta\theta_c$ — изменение угла и координат между соседними точками интервала с номером $c \in [1; Y]$.

Таким образом, L_{cont} представляет общую длину границы контакта между компонентами на изображении.

3.5. Расчет удельной поверхности. Удельная поверхность H_{SSA} представляет собой отношение длины границы контакта L_{cont} к общей площади материала A_{total} :

$$H_{SSA} = L_{cont} / A_{total}.$$

Таким образом, удельная поверхность H_{SSA} предоставляет метрику, оценивающую, насколько «компактно» распределены границы контакта между компонентами относительно общей площади материала.

4. Процесс масштабирования

В данном разделе рассматривается процесс масштабирования, включающий этапы распознавания и преобразования данных о масштабе.

4.1. Распознавание данных о масштабе. Первый этап процесса масштабирования связан с распознаванием текстовой информации, представляющей численное значение масштаба на изображении. В рамках этого этапа используется оптическое распознавание символов (OCR), которое преобразует изображение в текстовую строку.

Полученная текстовая строка, содержащая значение масштаба, сохраняется в отдельной переменной.

4.2. Преобразование данных о масштабе. На втором этапе процесса данные о масштабе преобразуются в числовое значение, представляющее собой длину в микронах. Для этого применяется метод извлечения численной информации из текстовой строки.

Процесс извлечения включает в себя анализ текста с использованием регулярных выражений. Этот метод преобразует текстовую строку в числовое значение s . Полученное числовое значение s представляет собой масштаб, используемый для перевода результатов измерений в микроны.

4.3. Вычисление удельной поверхности в микронах. Имея значение масштаба s , можно получить значение реальной удельной поверхности:

$$H_{RSSA} = s \cdot H_{SSA}. \quad (2)$$

Этот процесс обеспечивает эффективное масштабирование внутри системы, а именно переход от относительных измерений, выполненных в пикселях, к реальным физическим значениям в микронах. Это позволяет корректно интерпретировать результаты измерений на изображении, что существенно для точного анализа характеристик композиционных покрытий. Для остальных характеристик процесс преобразования аналогичен преобразованию (2).

5. Обсуждение результатов работы и область их применения

Разработанная информационно-измерительная система проявила высокую точность в анализе качества двухкомпонентных композиционных покрытий при производстве элементов электроники. Результаты обработки изображений подтверждают надежность разработанной системы в определении контуров и анализе структуры материалов. Для более надежной верификации работы системы было проведено тестирование на оборудовании Поволжского дизайн-центра микроэлектроники «Бином» при Самарском государственном техническом университете. Этот шаг не только подтвердил соответствие системы высоким стандартам точности, но также продемонстрировал ее применимость в реальных промышленных условиях.

Алгоритмы анализа качества двухкомпонентных композиционных покрытий в разработанной системе продемонстрировали высокую точность и устойчивость к различным артефактам в изображениях. В качестве примера на рис. 1 приведено распределение частот появления различных интенсивностей в анализируемом изображении, построенное с помощью разработанной системы. На рис. 2 приведено исходное (анализируемое) изображение, а на рис. 3 — изображение покрытия после проведения анализа.

Полученные результаты на образцах с известными дефектами и реальных материалах в условиях производства электроники свидетельствуют о перспективности внедрения системы в производственные процессы.

Табл. 1 содержит рассчитанные параметры, такие как удельная поверхность, общая площадь материала и другие.

Результаты исследования вносят значительный вклад в различные обла-

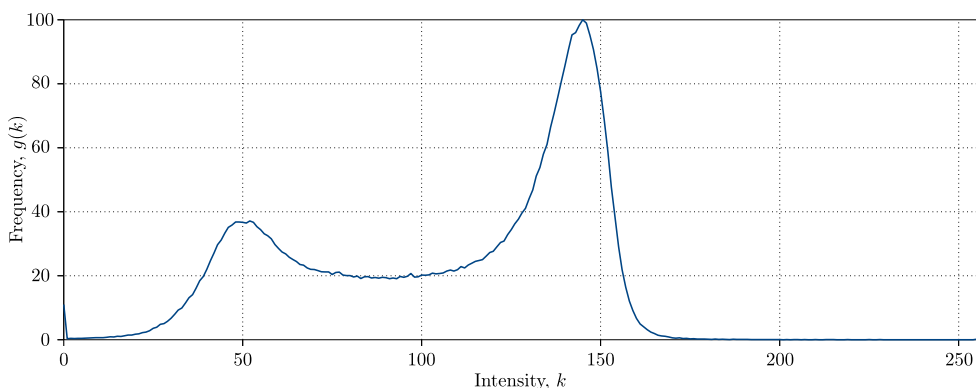


Рис. 1. Распределение частот появления различных интенсивностей (1) в анализируемом изображении

[Figure 1. Frequency distribution of the appearance of different intensities for Eq. (1) in the analyzed image]

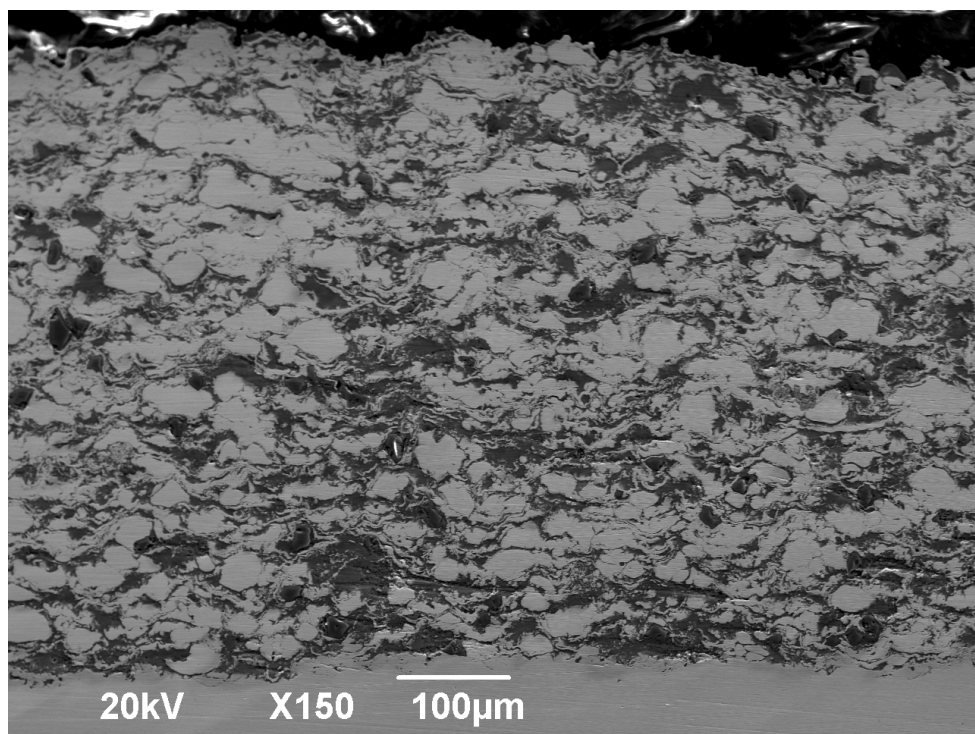


Рис. 2. Анализируемое изображение покрытия, полученное с помощью электронного микроскопа в формате .tif (1280×960 px)

[Figure 2. Analyzed image of the coating obtained by an electron microscope in the .tif format (1280×960 px)]

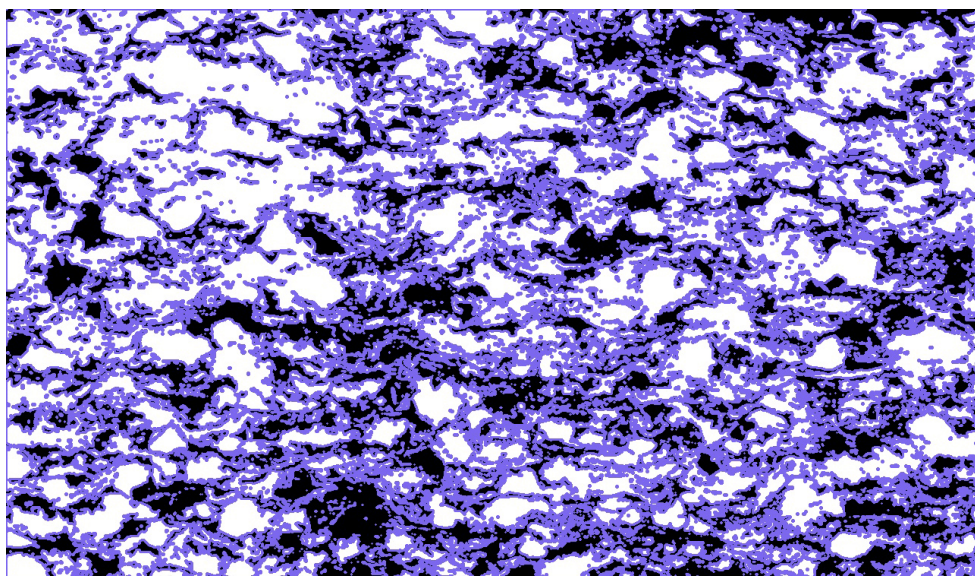


Рис. 3. Изображение покрытия после проведения анализа

[Figure 3. Image of the coating after the analysis]

Таблица 1

Рассчитанные параметры анализа двухкомпонентных композиционных покрытий
[Calculated parameters for the analysis of two-component composite coatings]

Parameters	Values
Specific surface area, H_{SSA}	0.18 px^{-1}
Real specific surface area, H_{RSSA}	0.27 μm^2
Total area of material, A_{total}	421034.17 μm^2
Dark material area, A_{dark}	262399.90 μm^2
Light material area, A_{light}	158634.27 μm^2
Contact boundary length, L_{cont}	114067.69 μm

сти применения:

- внедрение системы в процессы контроля качества для повышения эффективности и точности оценки материалов;
- использование системы для более глубокого анализа свойств и структуры двухкомпонентных композиционных покрытий;
- применение результатов исследования в разработке новых технологий и материалов с улучшенными характеристиками.

Заключение

В работе представлен метод анализа двухкомпонентных композиционных покрытий с использованием математически обоснованных алгоритмов обработки изображений. Полученные результаты открывают новые перспективы для совершенствования контроля качества материалов в промышленных процессах и научных исследованиях.

Предложена и реализована информационно-измерительная система обработки изображений, основанная на совокупности математических методов. Применение численных алгоритмов для анализа границ композиционных покрытий позволило добиться необходимой точности анализа.

Разработанный подход является эффективным инструментом для точного анализа материалов с выделением ключевых параметров, таких как удельная поверхность, общая площадь материала и границы контакта. Эти параметры могут быть востребованы в промышленных процессах для оценки качества и контроля производства.

В рамках исследования разработана система обработки изображений, минимизирующая накопление ошибок на каждом этапе и обеспечивающая высокую точность определения характеристик материалов.

Полученные результаты могут быть успешно внедрены в различные области промышленности, научных исследований и технологического развития. Система была успешно протестирована в Поволжском дизайн-центре микроэлектроники «Бином» при Самарском государственном техническом университете с использованием полиамидных покрытий, применяемых в производстве электроники. Это подтвердило применимость разработанной системы в реальных промышленных условиях.

Конкурирующие интересы. Конкурирующих интересов не имеем.

Авторская ответственность. Все авторы принимали участие в разработке концепции статьи и в написании рукописи. Авторы несут полную ответственность за

предоставление окончательной рукописи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

Библиографический список

1. Николаев В. М., Вертянов Д. В., Шишов А. М. [и др.] Обзор существующих технологий формирования микроэлектронных устройств на пластичных основаниях / *Современные тенденции в научной деятельности: VII Международная научно-практическая конференция* (Москва, 28 декабря 2015 г.). М.: Научный центр «Олимп», 2015. С. 981–989. EDN: [VDXLQZ](#).
2. Анисович А. Г. Особенности металлографического препарирования для анализа тонких слоев и покрытий // *Литье и металлургия*, 2020. № 2. С. 59–62. EDN: [MPCJQQ](#). DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-2-59-62>.
3. Лецковник А. В., Брылева О. В., Кабанков А. И., Семичева Л. Г. Методика подготовки микрошлифов для металлографического и микрорентгеноспектрального анализов металлополимерных соединений // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2014. Т. 1, № 10. С. 107–108. EDN: [PFSCXB](#).
4. Падалко В. С., Зрюмова А. Г., Каредин И. С., Искуснова Н. В. Разработка композитного материала для создания гибких тензометрических датчиков // *Ползуновский альманах*, 2021. № 4. С. 144–145. EDN: [RHUGSU](#).
5. Новиков А., Новотник М. Теплоотводное покрытие из композитного материала для высокотемпературной электроники // *Технологии в электронной промышленности*, 2017. № 4(96). С. 48–51. EDN: [ZCMRHL](#).
6. Терешенок А., Потапов С. Новые композитные материалы для терморегуляции мощной электроники // *Электроника: Наука, технология, бизнес*, 2022. № 8(219). С. 62–67. EDN: [KMUDKQ](#). DOI: <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.219.8.62.66>.
7. Терехова Ю. С., Киселев Д. А., Солнышкин А. В. Исследование сегнетоэлектрических нанокомпозитов на основе P(VDF-TrFE) методами сканирующей зондовой микроскопии // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*, 2021. Т. 24, № 2. С. 71–78. EDN: [TGQRRK](#). DOI: <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-2-71-78>.
8. Хмыль А. А., Ланин В. Л., Емельянов В. А. *Гальванические покрытия в изделиях электроники*. Минск: Интегралполиграф, 2017. 480 с. EDN: [CHSIYS](#).
9. Мустафаев Г. А., Мустафаева Д. Г., Мустафаев М. Г. Получение однородных по структуре и равномерных по толщине диэлектрических покрытий при формировании приборных структур // *Нано- и микросистемная техника*, 2017. Т. 19, № 3. С. 131–136. EDN: [YHXAKZ](#). DOI: <https://doi.org/10.17587/nmst.19.131-136>.
10. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. New York: Pearson Education, 2018. 1019 pp.

MSC: 68U10

Analysis for two-component composite coatings in the production of electronic components by computer vision methods

M. V. Nenashev, O. S. Rakhmanin, V. V. Kiyashchenko

Samara State Technical University,

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation.

Abstract

A method for analyzing two-component composite coatings in the production of electronic components is presented, based on a system of mathematically grounded image processing algorithms. This method allows for the determination of the specific surface area, total material area, and contact boundaries, ensuring high accuracy and result stability. The obtained results can be successfully integrated into industrial processes for material quality assessment and production control. Within the scope of the study, an information-measurement image processing system has been developed, minimizing error accumulation at each stage and ensuring high precision in determining material characteristics. Examples of successful method application are presented, highlighting its effectiveness and prospects in various areas, including industrial production of electronic components. The obtained results serve as a basis for further research and refinement of methods for analyzing composite materials.

Keywords: composite coatings, image analysis, specific surface area, verification of the electronic components production.

Received: 15th December, 2023 / Revised: 18th January, 2024 /

Accepted: 29th January, 2024 / First online: 18th March, 2024

Mathematical Modeling, Numerical Methods and Software Complexes Short Communication

© Authors, 2024

© Samara State Technical University, 2024 (Compilation, Design, and Layout)

 The content is published under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Please cite this article in press as:

Nenashev M. V., Rakhmanin O. S., Kiyashchenko V. V. Analysis for two-component composite coatings in the production of electronic components by computer vision methods, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2024, vol. 28, no. 1, pp. 186–198. EDN: GGJQTI. DOI: [10.14498/vsgtu2068](https://doi.org/10.14498/vsgtu2068) (In Russian).

Authors' Details:

Maxim V. Nenashev  <https://orcid.org/0000-0003-3918-5340>

Dr. Tech. Sci., Professor; First Vice-Rector–Vice-Rector for Scientific Work; University Administration; e-mail: nenashev.mv@samgtu.ru

Oleg S. Rakhmanin  <https://orcid.org/0000-0001-7337-268X>

Cand. Tech. Sci., Associate Professor; Head of the Laboratory; Lab. of Digital Doubles of Materials and Technological Processes of their Processing; e-mail: rakhmanin.os@samgtu.ru

Victoria V. Kiyashchenko  <https://orcid.org/0000-0001-9710-2860>

Postgraduate Student; Junior Researcher; Lab. of Digital Doubles of Materials and Technological Processes of their Processing; e-mail: vv.kiyashchenko@gmail.com

Competing interests. We have no competing interests.

Authors' contributions and responsibilities. All authors participated in developing the concept of the article and in writing the manuscript. The authors take full responsibility for providing the final manuscript for publication. The final version of the manuscript was approved by all authors.

Funding. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task (theme no. AAAAA12-2110800012-0).

References

1. Nikolaev V. M., Vertianov D. V., Shishov A. M., et al. Review of existing technologies for the formation of microelectronic devices on plastic substrates, In: *Sovremennye tendentsii v nauchnoi deiatel'nosti* [Modern Trends in Scientific Activity], VII Intern. Sci.-Pract. Conf. (Moscow; 28 December, 2015). Moscow, Sci. Center "Olimp", 2015, pp. 981–989 (In Russian). EDN: [VDXLQZ](#).
2. Anisovich A. G. Particularities of metallographic preparation for the analysis of thin layers and coatings. foundry production and metallurgy, *Foundry Production and Metallurgy*, 2020, no. 2, pp. 59–62 (In Russian). EDN: [MPCJQQ](#). DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-2-59-62>.
3. Letckovnik A. V., Bryleva O. V., Kabankov A. I., Semicheva L. G. Methodology for preparing microsections for metallographic and micro-X-ray spectral analyzes of metal-polymer compounds, *Aktualnye Problemy Aviatsii Kosmonavтики*, 2014, vol. 1, no. 10, pp. 107–108 (In Russian). EDN: [PFSCXB](#).
4. Padalko V. S., Zryumova A. G., Karelin I. S., Iskusnova N. V. Development of a composite material for creating flexible strain gauge sensors, *Polzunovskii Almanakh*, 2021, no. 4, pp. 144–145 (In Russian). EDN: [RHUGSU](#).
5. Novikov A., Novotnik M. Heat-dissipating composite material coating for high temperature electronics, *Tekhnologii Elektronnoi Promyshlennosti*, 2017, no. 4(96), pp. 48–51 (In Russian). EDN: [ZCMRHL](#).
6. Tereschenok A., Potapov S. New composite materials for thermoregulation of high-power electronics, *Electronics: Science, Technology, Business*, 2022, no. 8(219), pp. 62–67 (In Russian). EDN: [KMUDKQ](#). DOI: <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2022.219.8.62.66>.
7. Terekhova Yu. S., Kiselev D. A., Solnyshkin A. V. Scanning probe microscopic study of P(VDF-TrFE) based ferroelectric nanocomposites, *Modern Electronic Materials*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 11–16. EDN: [EAVYXE](#). DOI: <https://doi.org/10.3897/j.moem.7.1.73283>.
8. Khmyl A. A., Lanin V. L., Emelyanov V. A. *Gal'vanicheskie pokrytiia v izdeliakh elektroniki* [Galvanic Coatings in Electronics Products]. Minsk, Integralpoligraf, 2017, 480 pp. (In Russian). EDN: [CHSIYS](#).
9. Mustafaev G. A., Mustafaeva D. G., Mustafaev M. G. Obtaining of dielectric coatings, uniform by their structure and thickness, during formation of the instrument structures, *Nano- and Microsystems Technology*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 131–136 (In Russian). EDN: [YHXAKZ](#). DOI: <https://doi.org/10.17587/mmst.19.131-136>.
10. Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. New York, Pearson Education, 2018, 1019 pp.