

УДК 621.793  
DOI: 10.12737/20243

В.П. Матлахов, А.Н. Игнатов, А.Г. Суслов

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЦЕНТНОГО СОСТАВА КОМПОНЕНТОВ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Рассмотрены алгоритмы обработки изображения. Предложена практическая реализация программного модуля для определения процентного состава компонентов в нитрид-титановых покрытиях по фотографии. Исследована взаимосвязь каче-

ства поверхностного слоя и износостойкости с условиями напыления покрытий TiN.

**Ключевые слова:** программный модуль, бинаризация изображений, пороговая обработка изображений, износостойкие покрытия, процентный состав компонентов.

V.P. Matlakhov, A.N. Ignatov, A.G. Suslov

## SOFTWARE MODULE DEVELOPMENT FOR DEFINITION OF PERCENTAGE COMPOSITION IN ANTIWEAR COATINGS

For the analysis of material property changes depending on external factors in materials science there is used a method of the micro-structure analysis of material obtained with the aid of a special optic or electronic microscope. Recently the increasing distribution and application have obtained program-hardware complexes for the automation of metallographic researches which allow speeding up considerably this process. The basis for the development of such complexes is a technology of technical (computer) vision – the theory for the creation of models and algorithms which can carry out the detection and classification of objects and also the processing all research data. For the efficient change of FOP parameters, and also to ensure a convergence (repetition) of test results it is necessary to

ensure the authenticity of research data processing. It is achieved by means of the application of a specially developed software module for the definition of percentage composition in nitride-titanium and other wear-resisting coatings according to Photomath photographs. As input data for the software module there are used coating microstructure photos obtained with the aid of PMT-3M hardness meter. In the module mentioned all essential transformations for the further computation of a percentage composition with the obtaining of a result for a user and also saving in a database are carried out.

**Key words:** software module, image binarization, image threshold processing, wear-resisting(antiwear) coatings, percentage composition.

Развитие современной техники предполагает применение новых материалов, обладающих специальными свойствами (тугоплавкие, высокопрочные, коррозионно-стойкие и др.), а также совершенствование технологий упрочнения. Одной из технологий нанесения покрытий являются методы физического осаждения покрытий (ФОП), получившие в мировой практике название PVD (physical vapor deposition)[1]. Создание новых материалов и способов их обработки должно базироваться на знаниях о внутренних процессах и превращениях, происходящих в ходе производства и эксплуатации изделий, что обуславливает необходимость комплексного использования всех современных методов исследования, в том числе и структурных методов

анализа. Для изучения изменения свойств материалов в зависимости от внешних факторов в материаловедении (металловедении) используется метод изучения изображения микроструктуры материала, полученного при помощи специального оптического или электронного микроскопа. Микроанализ позволяет характеризовать размеры и расположение различных фаз, присутствующих в сплавах. Размеры компонентов (зерен) определяются либо методами количественной металлографии, либо путем сопоставления структуры с заранее составленными шкалами.

В лаборатории УНТИ БГТУ ведутся работы по изменению свойств материалов методом физического осаждения покрытий. Это высокоэффективный

способ поверхностного упрочнения тяжело нагруженных деталей, эксплуатирующихся, как правило, при высоких температурах в условиях контактных взаимодействий. Разработана методика технологического процесса, включающего себя: вакуумное испарение тугоплавкого металла (титана), его ионизацию, подачу реакционного газа, химические и плазмохимические реакции, конденсацию покрытия на рабочих поверхностях образцов. В настоящее время проведены опытные исследования с целью определения взаимосвязи качества поверхностного слоя и износостойкости с условиями электромеханической обработки нитрид-титановых покрытий [2-5].

В последнее время все большее распространение и применение находят программно-аппаратные комплексы для автоматизации металлографических исследований, которые позволяют значительно ускорить этот процесс. Основой для разработки таких комплексов является технология технического (компьютерного) зрения - теория создания моделей и алгоритмов, которые могут выполнять обнаружение и классификацию объектов, а также обработку всех данных исследования.

Для исследования микроструктуры напыленного покрытия на процент дефектных составляющих в фазе TiN (капельная фаза  $\alpha$ -Ti, открытые поры, отслоения, наплывы) линейным методом Розиваля на приборе ПМТ-3М с общим увеличением окуляра и ахроматического эпиобъектива, равным 487х, осуществлялось фотографирование образцов с последующим анализом данных. Для оперативного изменения параметров ФОП, а также для обеспечения сходимости (повторяемости) результатов испытаний необходимо обеспечить достоверность обработки данных исследования. Это достигается применением специально разработанного программного модуля для определения процентного состава компонентов в нитрид-титановых и других износостойких покрытиях по фотографии PhotoMath. В данном модуле выполняются все необходимые преобразова-

ния для последующего подсчета процентного состава с выдачей готового результата пользователю, а также сохранение в базе данных.

В качестве входных данных программного модуля выступают фотографии микроструктуры покрытия, полученные при помощи микротвердомера ПМТ-3М. Для обработки этих данных используется методологический аппарат компьютерного зрения, в частности сегментация - процесс разделения цифрового изображения на несколько сегментов (множеств пикселей, также называемых суперпикселями). Цель сегментации заключается в упрощении и/или изменении представления изображения, чтобы его было проще и легче анализировать. Сегментация изображений используется для того, чтобы выделить объекты и границы (линии, кривые и т. д.) на изображениях. Более точно, сегментация изображений - это процесс присвоения таких меток каждому пикселю изображения, что пиксели с одинаковыми метками имеют общие визуальные характеристики. Один из основных и простых способов - построение сегментации с помощью порога. Порог - это признак (свойство, в нашем случае - цвет выбранной компоненты), который делит изображение на классы. Операция порогового разделения, которая в результате дает бинарное изображение, называется бинаризацией. Функция бинаризации представлена на рис. 1.

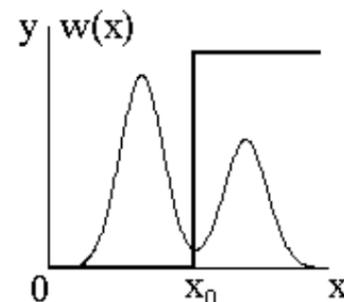


Рис. 1. Функция бинаризации

При бинаризации изображения яркость каждого пикселя  $B(x,y)$  сравнивается с пороговым значением яркости  $B_T(x,y)$ . Если значение яркости пикселя выше значения яркости порога, то на бинарном изображении соответствующий пиксель будет

белым. В противном случае он будет черным.

Необходимость устранения большого числа ошибок процесса бинаризации повлекла за собой появление большого числа методов бинаризации, которые делятся на две группы по принципу построения пороговой поверхности: методы глобальной и локальной бинаризации [6-8].

Пороговой поверхностью является матрица размерностью  $M \times N$ , соответствующей размерности исходного изображения. Каждая ячейка матрицы задает порог яркости бинаризации для соответствующего пикселя на исходном изображении.

В методах глобальной бинаризации пороговая поверхность является плоскостью с постоянным значением пороговой яркости, а в методах локальной бинаризации значение пороговой яркости меняется от точки к точке изображения и рассчитывается на основе некоторых локальных признаков в окрестности пикселя.

Пороговая обработка изображения может проводиться разными способами.

1. Бинаризация с нижним порогом. Это наиболее простая операция, в которой используется только одно значение порога:

$$f'(m,n) = \begin{cases} 0, f(m,n) \geq t; \\ 1, f(m,n) < t. \end{cases}$$

Все значения меньше критерия становятся 1 (в данном случае 255 (белый)), все значения (амплитуды) пикселей больше порога  $t - 0$  (черный).

2. Бинаризация с верхним порогом. Иногда можно использовать вариант первого метода, который дает негатив изо-

$$\text{Gray} = \text{Round}((\text{Max}(R,G,B) + \text{Min}(R,G,B))/2);$$

- расширение динамического диапазона оттенков серого ( $L_{\min}, L_{\max}$ ) до максимального (0, 255) для повышения контра-

$$\text{Gray} = \text{Round}(255(\text{Gray} - L_{\min}) / (L_{\max} - L_{\min}));$$

- прохождение по изображению медианного фильтра для исключения мелких дефектов (точки пыли, царапины) и сглаживания исходного изображения;

- применение фильтра Гаусса (с целью снижения уровня цифрового шума преобразования при фотографировании и повышения локальной контрастности) для

бражения, полученного в процессе бинаризации. При этом

$$f'(m,n) = \begin{cases} 0, f(m,n) \leq t; \\ 1, f(m,n) > t. \end{cases}$$

3. Бинаризация с двойным ограничением. Для выделения областей, в которых значения яркости пикселей могут меняться в известном диапазоне, вводится бинаризация с двойным ограничением ( $t_1 < t_2$ ):

$$f'(m,n) = \begin{cases} 0, f(m,n) \geq t_1; \\ 1, t_1 < f(m,n) \leq t_2; \\ 0, f(m,n) \geq t_2. \end{cases}$$

4. Неполная пороговая обработка. Данное преобразование дает изображение, которое может быть проще для дальнейшего анализа, поскольку оно становится лишенным фона со всеми деталями, присутствующими на исходном изображении.

Также возможны другие вариации с порогами, где пропускается только часть данных (среднеполосовой фильтр), когда выбранная компонента имеет промежуточный цвет, отличный от фона и цвета других компонент.

В настоящей программе используется пороговая бинаризация с предварительной обработкой полученного изображения, что дополнительно повышает различимость исследуемой компоненты. Последовательность выполнения данной операции выглядит следующим образом:

- перевод цветового пространства RGB в оттенки серого (с максимальной разностью между цветовыми компонентами):

ста между оттенками серого (эквализация гистограммы):

обработки серого изображения с последующим вычитанием исходного.

Программа PhotoMath-2 представляет собой оконное приложение Windows, которое предназначено для определения процентного состава компонентов в нитрид-титановых покрытиях. Программа

разработана в интегрированной среде разработки Borland Delphi 7 (рис. 2).

Программа PhotoMath может работать в двух режимах: автоматическом и ручном. В ручном режиме осуществляется последовательное прохождение всех этапов действия программы и определение необходимых параметров (так называемое первичное обучение). Автоматический режим предназначен для выполнения всех этапов с заранее определенными (в ручном режиме) параметрами; при этом происходит поиск всех файлов в директории Photo-In и сохранение результатов в файл MemoLog\_Date.

Для упрощения работы программы и исключения ложных срабатываний алгоритма определения рабочей площади кадра

(ввиду неравномерности засветки, геометрических aberrаций (искажений) оптической системы и пр.) принимается допущение, что искомая область - круг с радиусом  $R$ . Тогда

$$\text{Count\_Field} = \pi R^2,$$

где  $\text{Count\_Field}$  - требуемое значение рабочей площади кадра (единица измерения  $\text{Count\_Field}$  - пиксель в квадрате).

Для нахождения заданных объектов ( $Ti$ -компонент, пор, дефектов) используется метод подсчета элементов битовой матрицы изображения, имеющих значение яркости больше предварительно установленного заданного значения порога бинаризации, что соответствует черному цвету.

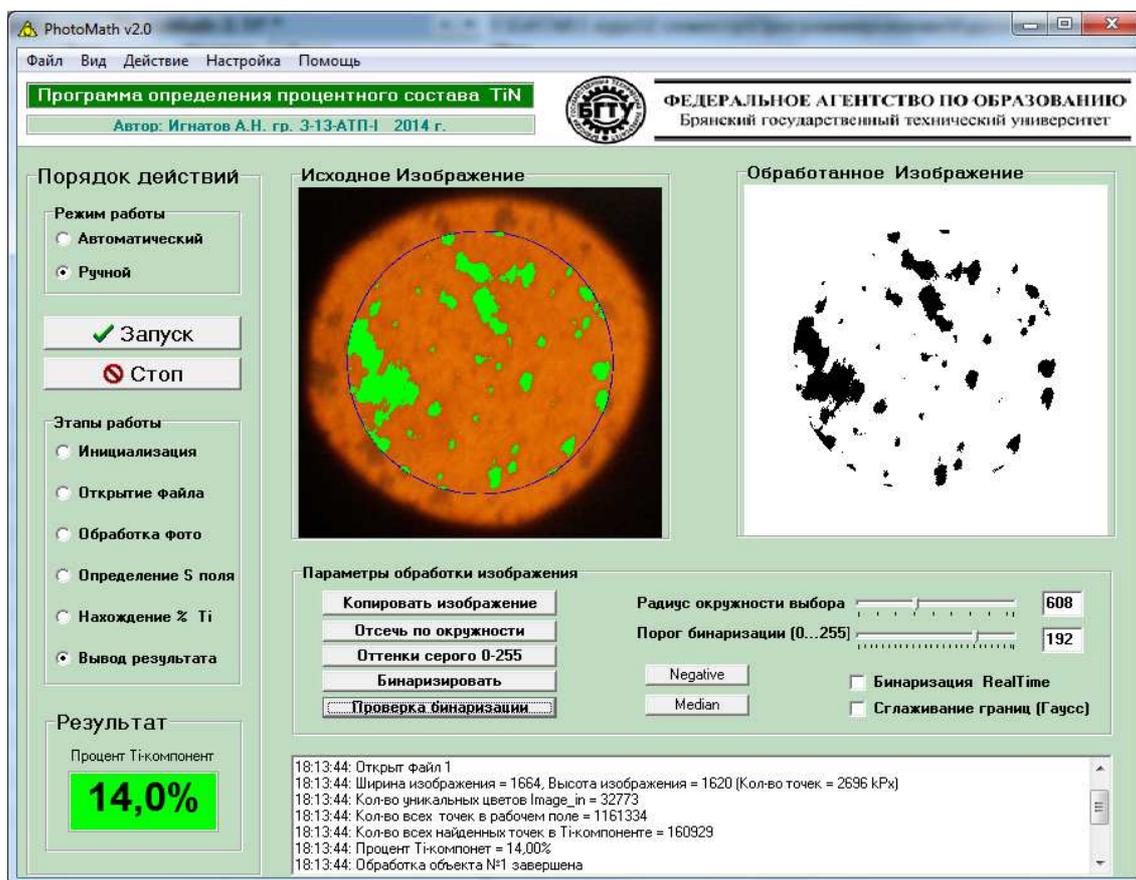


Рис. 2. Основное окно программы

Таким образом, задача подсчета  $Ti$ -компонент сводится к подсчету количества черных точек на изображении  $\text{Image\_out}$  (объект  $\text{Canvas}$ ). Их число обозначается  $\text{Count\_Ti}$ .

Искомое значение процентного состава компонентов в нитрид-титановых покрытиях определяется по формуле

$$Ti = \frac{\text{Count\_Ti}}{\text{Count\_Field}} 100\%.$$

Для визуальной проверки правильности подбора порога бинаризации, а также для общей оценки корректности работы программы используется кнопка «Проверка бинаризации». При этом на исходном изображении  $T_i$ -компоненты, найденные по заданным параметрам бинаризации, подсвечиваются зеленым цветом.

Особенности программы PhotoMath:

- Все настройки программы сохраняются в ini-файле. Они служат для использования предустановленных параметров обработки, определенных в ручном режиме, при автоматическом режиме работы программы.

- Каждое действие пользователя записывается в log-файл и служит для анализа результатов работы алгоритмов программы.

- Проверка верности распознавания путем наложения полученного разделения компонент на исходное изображение и визуального контроля.

Данное программное средство можно использовать для определения числового отношения каких-либо компонент в любом объекте исследования. Например, аналогичная программа может быть разработана для контроля геометрических размеров и сортировки выпускаемой продукции.

Таким образом, при разработке программного модуля:

- Решена задача по автоматизации деятельности сотрудника лаборатории, в

которой реализованы все функции, описанные в постановке задачи.

- Разработаны и применены комбинированные методы обработки изображения с учетом свойств реального объекта исследования.

- Проведены испытания программного продукта.

- Установлено, что имеется возможность полной автоматизации эксперимента (управление фотоаппаратом, передача данных и их обработка в автоматическом режиме с выдачей результата в базу данных, построение графиков).

Созданная автоматизированная система определения процентного состава износостойких покрытий позволяет сократить трудо- и времязатраты сотрудника лаборатории, занимающегося исследованием микроструктуры покрытий. Проанализировав полученные результаты и рассмотрев альтернативные методы решения задачи, можно определить пути дальнейшей модернизации данного программного модуля:

1. Использование специализированных программных продуктов, таких как LabView, Matlab и др.

2. Создание аналогичного программного продукта с применением библиотеки компьютерного зрения с открытым исходным кодом - OpenCV.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матлахов, В.П. Нанесение износостойких покрытий на инструмент методом КИБ/ В.П. Матлахов, Ю.В. Дарковский //СТИН.- 2006. - №12. - С. 17-20.
2. Матлахов, В.П. Обеспечение износостойкости цилиндрических поверхностей трения упрочнением / В.П. Матлахов//Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение, 2007. – №5(29). – С. 41-46.
3. Горленко, А.О. Технологическое повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения / А.О. Горленко, В.П. Матлахов // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2010.- №5.- С. 20-26 .
4. Горленко, А.О. Моделирование контактного взаимодействия и изнашивания цилиндрических поверхностей трения / А.О. Горленко, В.П. Матлахов // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2007.- №8.- С. 1-9 .
5. Матлахов, В.П. Повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения на основе сочетания методов нанесения нитрид-титановых покрытий и электромеханической обработки/ В.П. Матлахов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2008.- №2.- С. 32-38.
6. Яншин, В.В. Обработка изображений на языке СИ для IBM PC: Алгоритмы и программы/ В.В. Яншин, Г.А. Калинин. – М.: Мир, 1994. – 320 с.
7. Ярославский, Л.П. Введение в цифровую обработку изображений/ Л.П. Ярославский.- М.: Мир, 1992. – 344 с.
8. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений/ У. Прэтт. – М.: Наука, 2000. – 1024 с.

1. Matlakhov, V.P. Wear-resistant Coating on Tools by KIB Method/ V.P. Matlakhov, Yu.V. Darkovsky //STIN.- 2006. - №12. - pp. 17-20.
2. Matlakhov, V.P. Assurance of wear-resistance in friction cylindrical surfaces by strengthening / V.P. Matlakhov//Strengthening Technologies and Coatings. – M.: Mechanical Engineering, 2007. – №5(29). – pp. 41-46.
3. Gorlenko, A.O. Wear-resistance increase in friction cylindrical surfaces / A.O. Gorlenko, V.P. Matlakhov // Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms. - 2010.- №5.- pp. 20-26 .
4. Gorlenko, A.O. Simulation of contact interaction and wear of friction cylindrical surfaces / A.O. Gorlenko, V.P. Matlakhov // Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms. - 2007.- №8.- pp. 1-9 .
5. Matlakhov, V.P. Wear-resistance increase in friction cylindrical surfaces based on combination of nitride-titanium coating and electro-machining/ V.P. Matlakhov // Bulletin of Bryansk State Technical University. - 2008.- №2.-pp. 32-38.
6. Yanshin, V.V. Image Processing in C language for IBM PC: Algorithms and Programs/ V.V. Yanshin, G.A. Kalinin. – M.: World, 1994. – pp. 320.
7. Yaroslavsky, L.P. Introduction in Digital Image Processing/ L.P. Yaroslavsky.- M.: World, 1992. – pp. 344.
8. Pratt, W. Digital Image Processing/ W. Pratt. – M.: Science, 2000. – pp. 1024.

*Статья поступила в редколлегию 14.03.2016.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Горленко А.О.*

#### Сведения об авторах:

**Матлахов Виталий Павлович**, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированные технологические системы» Брянского государственного технического университета, e-mail: [atsys@tu-bryansk.ru](mailto:atsys@tu-bryansk.ru).

**Игнатов Александр Николаевич**, инженер-электроник, БРУ АО «Транснефть-Дружба», отдел АСУ ТП, e-mail: [ai-80@bk.ru](mailto:ai-80@bk.ru).

**Суслов Анатолий Григорьевич**, д.т.н., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, тел.: (4832) 51-19-97.

**Matlakhov Vitaly Pavlovich**, Can.Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Automated Technological Systems” Bryansk State Technical University, e-mail: [atsys@tu-bryansk.ru](mailto:atsys@tu-bryansk.ru).

**Ignatov Alexander Nikolayevich**, Electronic-engineer, BRD of "Transoil “Friendship” Co, Dep. AMS TP, e-mail: [ai-80@bk.ru](mailto:ai-80@bk.ru).

**Suslov Anatoly Grigorievich**, D.Eng., Prof. of Bauman State Technical University of Moscow, Phone: (4832) 51-19-97.