

Л.Г. Ахметшина, А.А. Егоров

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ БИНАРИЗАЦИИ СНИМКОВ ОТПЕЧАТКОВ ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ МОДИФИКАЦИИ ЯРКОСТИ И КОНТРАСТА

Аннотация. Рассмотрена модель усиления яркости и контраста, благодаря применению которой достигается повышение достоверности бинаризации RGB снимков отпечатков поверхности покрытий на металлической подложке, которая проводится с целью дальнейшего определения пористости образцов.

Введение. При создании новых покрытий металлов важной характеристикой является их пористость, которая оказывает существенное влияние на коррозионную стойкость покрытия. Для вычисления пористости покрытия металла существуют различные способы, среди которых хотелось бы выделить метод наложения, который является достаточно простым, но в то же время и наиболее часто используемым.

Суть метода заключается в наложении на поверхность покрытия фильтровальной бумаги, смоченной специальным раствором. В результате этого на бумаге формируется отпечаток поверхности покрытия металла. После снятия бумаги с отпечатками пор в виде точек или пятен ее промывают дистиллированной водой, просушивают на чистом стекле и осуществляют вычисление пористости на основе визуального анализа [1]. Достоинством данного метода является низкая стоимость проведения эксперимента и минимальные требования к наличию специального оборудования.

К существенным недостаткам следует отнести необходимость «ручного» подсчета числа пор, что в случае их большого количества и маленьких размеров делает этот процесс достаточно трудоемким. Решение задачи может осложняться наличием размытых областей на отпечатке, что приводит к снижению точности оценки.

Актуальность исследований. Для автоматизации процесса определения пористости методом наложения важным шагом является бинаризация снимка отпечатка поверхности покрытия на металлической подложке, который, как правило, является цветным изображением. При решении этой задачи необходимо определить граничный уровень яркости, на основании которого будет проведено разделение на поры и фон. Однако при формировании снимка отпечатка поверхности покрытия на нем могут возникнуть низкоконтрастные области, которые, как и размытые фрагменты, снижают точность разделения.

Одним из способов повышения достоверности выявления пор является предшествующее бинаризации усиление яркости и контраста исходного изображения. Для эффективного решения поставленной задачи к используемым для этого методам выдвигаются следующие требования: адаптивность, минимальное количество (в идеальном случае их не должно быть вообще) управляющих параметров, что важно для снижения временных затрат при их настройке, отсутствие цветовых искажений (чтобы избежать неправильной идентификации пор и фона). Традиционные методы повышения яркости и контраста (гамма-коррекция, эквализация гистограммы, адаптивная эквализация гистограммы, растяжение контраста [2]) не удовлетворяют ряду вышеперечисленных требований.

В работах [3, 4] были предложены адаптивные методы повышения яркости, гистограммной коррекции и пространственного контрастирования, которые базируются на применении степенных преобразований и статистических характеристиках как изображения в целом, так и его окон (неперекрывающиеся фрагменты одинакового размера) каждого цветового канала исходного снимка и удовлетворяют всем вышеперечисленным требованиям.

Постановка задачи. В данной статье рассматривается модель усиления яркости и контраста на базе применения адаптивных методов [3, 4] для повышения достоверности выявления пор при бинаризации снимков отпечатков поверхности покрытий на металлической подложке.

Результаты исследований. Суть метода адаптивного повышения яркости, позволяющего выполнить ее автоматическую оценку, на основе которой принимается решение о необходимости выполнения этой операции, заключается в автоматическом пропорциональном по-

вышении интенсивности обрабатываемого изображения и содержит пять этапов.

1. Производится автоматическая оценка яркости V каждого цветового канала:

$$V = \sum_{j=1}^{N_w} \left((I)^{1-v_j} - (I)^{\frac{\bar{i}_j+I}{2}} \right), \quad (1)$$

где $I = (\bar{I} + 0.5) / 2$, \bar{i}_j – средняя яркость j -го окна; N_w – количество окон, зависящее от размеров окна; \bar{I} – средний уровень яркости выбранного цветового канала, а v_j – оценка уровня яркости j -го окна, вычисление которой происходит так:

- если $N_{i1} > 0$ (количество пикселей j -го окна, уровень яркости которых не меньше, чем i_j) и $i_j^1 \neq 0$, то:

$$v_j = (i_j) \left(\frac{1 - \operatorname{sgn}(i_j^1 - i_j^2) * \frac{\min(i_j^1, i_j^2) * \bar{i}_j}{\max(i_j^1, i_j^2)}}{1} \right)^{1 + \operatorname{sgn}(i_j^1 - i_j^2) * \bar{i}_j}; \quad (2)$$

- если $N_{i1} > 0$ и $i_j^1 = 0$, то $v_j = (i_j)^{1 + \bar{i}_j}$; (3)

- если $N_{i1} = 0$, то $v_j = (i_j)^{1 - \bar{i}_j}$, (4)

где $i_j^1 = \bar{i}_j * \left(1 - \frac{N_{i1}}{N_p} \right)$, $i_j^2 = \bar{i}_j * \frac{N_{i1}}{N_p}$, $i_j = (\bar{i}_j + I) / 2$, а N_p – количество

пикселей окна. Если для всех цветовых каналов значение $V \geq 0$, то повышение яркости для изображения не выполняется.

2. Выполняется пропорциональное повышение яркости каждого окна:

$$w_{x,y}^2 = (w_{x,y}^1)^{1 - p_{x,y}^1}, \quad (5)$$

где $w_{x,y}^1$ и $w_{x,y}^2$ – пиксели с координатами x, y текущего окна входного и выходного изображений для этого шага алгоритма, соответственно;

$p_{x,y}^1$ вычисляется по формулам:

$$p_{x,y}^1 = \left(\left((w_{x,y}^1)^{\max(p_{x,y}^2, 1 - p_{x,y}^2)} + (1 - w_{x,y}^1)^{\max(i_{w1}, 1 - i_{w1})} \right) / 2 \right)^{1 + p_{x,y}^3}, \quad (6)$$

$$p_{x,y}^2 = p_{x,y}^3 - \min_{p3}, \quad (7)$$

$$p_{x,y}^3 = \text{sgn}(p_{x,y}^4) * |p_{x,y}^4|^{1-p_{x,y}^4} + \text{sgn}(V) * |V|^{1-V}, \quad (8)$$

$$p_{x,y}^4 = (w_{x,y}^1)^{1-w_{x,y}^1} - (i_{w1})^{1-i_{w1}}, \quad (9)$$

причем $i_{w1} = (0.5 + \max_{w1} / 2 + \bar{i} + \bar{I}) / 4$; \min_{p3} , \max_{w1} – минимальное и максимальное значения по матрицам p^3 и w^1 , соответственно; \bar{i} – среднее значения по текущему окну входного для этого этапа изображения.

3. Осуществляется пропорциональное изменение яркости всех пикселей каждого окна:

$$w_{x,y}^3 = (w_{x,y}^2)^{\left(1 - \text{sgn}(p_{x,y}^{aft}) * |p_{x,y}^{aft}|^{1+p_{x,y}^{aft}}\right)}, \quad (10)$$

$$p_{x,y}^{aft} = (i_{w2})^{1-i_{w2}} - (w_{x,y}^2)^{1-w_{x,y}^2}, \quad (11)$$

В зависимости от статистических характеристик окна яркость его пикселей может быть, как повышена, так и понижена, что необходимо для корректировки результатов предыдущего этапа.

4. Для выполнения окончательной корректировки уровня яркости выбранного цветового канала в целом производится следующее преобразование:

$$\text{если } \text{sgn}(P_1) < 0, \text{ то } I_{x,y}^2 = \left(I_{x,y}^1\right)^{\left(1 - P_1 * (P_1)^{\left(I_{x,y}^1 + \min(I, 1-I)\right)/2}\right)}, \quad (12)$$

$$\text{иначе } I_{x,y}^2 = \left(I_{x,y}^1\right)^{\left(1 + P_1 * (P_1)^{\left(I_{x,y}^1 + \max(I, 1-I)\right)/2}\right)^{1 + \bar{I} - I_{x,y}^1}}, \quad (13)$$

где $I_{x,y}^1$ и $I_{x,y}^2$ – пиксели с координатами x, y входного и выходного изображений для этого шага алгоритма, соответственно; $P_1 = |P_2|^{1+P_2}$, $P_2 = 0.5^{1-I} - 0.5^{1-\bar{I}}$.

5. Этот шаг выполняется только для цветовых каналов исходного изображения, для которых на 1-ом этапе было получено значение $V \geq 0$, что свидетельствует о необходимости проведения корректирующего понижения яркости, выполняемого следующим образом:

$$I_{x,y}^3 = \left(I_{x,y}^2\right)^{1 + (\min(P_d, 1-P_d) - V^2 + V^1)/2}, \quad (14)$$

причем $P_d = \min(V^1, V^2) / \max(V^1, V^2)$; V^1 и V^2 – автоматические оценки яркости выбранного цветового канала изображений I^1 и I^2 , соответственно.

Метод адаптивного пространственного контрастирования обеспечивает повышение контраста на определенных участках изображения, сохраняя уровень интенсивности его высококонтрастных фрагментов, и состоит из 3-ех шагов.

1. Каждое окно входного изображения подвергается следующему преобразованию:

$$w_{x,y}^2 = (w_{x,y}^1)^{(1-k_{x,y} * w_{x,y}^1)}, \quad (15)$$

$$k_{x,y} = 10 \left(\lg \left(\frac{\bar{i}}{i} \right) + w_{x,y}^1 - \bar{i} \right) \quad (16)$$

В результате выполнения преобразования (15) для каждого пикселя текущего окна происходит сдвиг его уровня яркости к значениям 1 либо 0 в зависимости от коэффициента $k_{x,y}$, который вычисляется на основе интенсивности пикселя и среднего значения интенсивности окна, что и обеспечивает повышение контраста.

2. Возможны ситуации, когда преобразование (15) приводит к чрезмерному сдвигу яркости пикселя, компенсация которого и выполняется на этом шаге путем применения следующего преобразования к каждому окну изображения:

$$w_{x,y}^3 = (w_{x,y}^2)^{(p_{x,y}^1)^{p_{x,y}^1}}, \quad (17)$$

$$p_{x,y}^1 = \left| (p_{x,y}^2)^{p_{x,y}^2} + \operatorname{sgn}(\bar{i} - 0.5 * \max_{w2}) * \left(\bar{i} - 0.5 * \max_{w2} \right) \right|, \quad (18)$$

где $p_{x,y}^2 = (1 - w_{x,y}^2)^{1-\bar{i}}$, \max_{w2} – максимальное значение яркости в окне w^2 .

3. Осуществляется управляемая коррекция интенсивности пикселей полученного изображения с использованием статистических характеристик текущего окна и выбранного цветового канала в целом, для чего каждое окно подвергается такому преобразованию:

$$w_{x,y}^4 = (w_{x,y}^3)^{\left((1-\bar{i})^{\bar{i}} + P_{add} + (\bar{i})^{w_{x,y}^3} \right)}, \quad (19)$$

причем P_{add} выбирается на основе автоматической оценки яркости,

причем отрицательные значения приводят к повышению яркости, а положительные – к уменьшению.

Метод адаптивной гистограммной коррекции, состоящий из трех этапов, заключается в расширении диапазона яркости каждого цветового канала изображения, которое основано на использовании его гистограммы, что приводит к повышению контраста, а также обеспечивает некоторое повышение его яркости.

$$1. \text{ Если выполняется условие: } \min_0 \neq \max_0, \quad (20)$$

где \min_0 и \max_0 – значения минимального и максимального уровней яркости текущего окна, то над его гистограммой выполняется преобразование, обеспечивающее пропорциональное повышение яркости всех его пикселей, что также приводит к одновременному повышению контраста:

$$h_j^2 = \left(h_j^1\right)^{1-\text{sgn}(h_j^1-i_h) \cdot (d_j)^{|h_j^1-i_h|}}, \quad (21)$$

где h_j^1 , h_j^2 – это элементы вектора уровней интенсивности, содержащиеся в гистограмме текущего окна входного и выходного для этого

этапа изображений, соответственно; $d_j = \frac{|h_j^1 - i_h|^{1-|h_j^1 - i_h|}}{\max(i_h, 1 - i_h)^{1-\max(i_h, 1 - i_h)}}$;

$i_h = \left(\bar{i}_h\right)^{1-\text{sgn}(d_1) \cdot |d_1|^{|d_1|}}$; $d_1 = 0.5^{1-i} - 0.5^{\bar{i}}$; \bar{i}_h – среднее по вектору h^1 , а

$i = (\bar{i} + 0.5) / 2$. Если же условие (20) не выполняется, то вектор h^2 формируется следующим образом:

$$h_j^2 = h_j^1 - \min_1 + \min_0, \quad (22)$$

причем \min_1 , когда $\min_0 \neq 0$ вычисляется так:

$$\min_1 = \left(\min_0\right)^{1+(d_{\min})^{(d_{\min})^{d_{\min}}}}, \quad (23)$$

$$d_{\min} = \left(\left|\bar{i} - \min_0\right|^{1-|\bar{i} - \min_0|}\right) / i_{\max}, \text{ а } i_{\max} = \max(\bar{i}, 1 - \bar{i})^{1-\max(\bar{i}, 1 - \bar{i})}, \text{ иначе}$$

$\min_1 = 0$.

2. Для каждого окна входного для этого этапа изображения при выполнении условия $r > 1$, где r вычисляется следующим образом:

$$r = (\max_1 - \min_1) / (h_{\max}^2 - h_1^2), \quad (24)$$

причем h_{\max}^2 и h_1^2 – первый и последний элементы вектора h^2 , а \max_1 , когда $\max_0 \neq 1$, определяется по формуле:

$$\max_1 = (\max_0)^{1-(d_{\max})^{(\max_0)^{d_{\max}}}}, \quad (25)$$

где $d_{\max} = \left(\left| \bar{i} - \max_0 \right|^{1-|\bar{i}-\max_0|} \right) / i_{\max}$, а в противном случае – $\max_1 = 1$,

производится масштабированное расширение гистограммы этого окна:

$$h_j^3 = h_j^2 * r^2 - h_1^2 * (r^2 - 1) / 2, \quad (26)$$

3. Все уровни яркости пикселей текущего окна меняются на соответствующие им уровни яркости, содержащиеся в векторе h^3 (или h^2 , если второй шаг был пропущен), в результате чего и формируется выходное изображение.

В данной работе предлагается модель повышения яркости и контраста фотографических изображений, состоящая из следующих этапов.

1. К исходному изображению после масштабирования всех его цветовых каналов на отрезок $[0..1]$ применяется метод адаптивного повышения яркости.

2. Если на 1-ом шаге было выполнено повышение яркости, то к полученному изображению применяется метод адаптивной гистограммной коррекции.

3. Для изображения, полученного после предыдущих шагов, применяется метод адаптивного пространственного контрастирования.

4. К изображению, полученному после 3-го шага, применяется метод адаптивной гистограммной коррекции.

5. На последнем этапе происходит формирование выходного изображения путем слияния изображений, полученных в результате выполнения двух предыдущих шагов, осуществляемого следующим образом:

$$I_{x,y}^5 = (0.5 - \Delta_1) * I_{x,y}^4 + (0.5 + \Delta_1) * I_{x,y}^3, \quad (27)$$

$$\Delta_1 = \text{sgn}(\Delta_2) * |\Delta_2|^{1-|\Delta_2|}, \quad (28)$$

где $I_{x,y}^3$, $I_{x,y}^4$ и $I_{x,y}^5$ пиксели с координатами x, y выбранного цветового канала для выходного изображения 3-го, 4-го и 5-го шагов, соответ-

ственно; Δ_2 – разность средних значений по выбранному цветовому каналу выходных изображений для 3-го и 4-го этапов.

В результате проведения экспериментов размерность окон при применении методов адаптивного повышения яркости и пространственного контрастирования была выбрана равной 3x3 пикселей, а при использовании метода адаптивной гистограммной коррекции – совпадающей с размерностью изображения.

После повышения яркости и контраста выполняется бинаризация изображения на основе разделения по уровню яркости, которая осуществляется следующим образом:

1. Если исходный снимок – цветной, то выполняются следующие действия, в результате чего формируется полутоновое изображение:

- для всех пикселей, значение интенсивности которых в наиболее информативном цветовом канале не превышает значения T_1 , выбор итогового значения яркости происходит на основе минимального из значений интенсивностей для каждого из цветовых каналов, причем T_1 вычисляется следующим образом:

$$T_1 = (\bar{I} / 2 + \bar{I}_1) / 2, \quad (29)$$

где \bar{I}_1 – среднее по тем интенсивностям пикселей, значения которых не превышают \bar{I} (среднее значение) для наиболее информативного цветового канала;

- для пикселей, значение яркости которых не удовлетворяет вышеуказанному условию, выбор итогового значения интенсивности происходит на основе среднего по значениям яркостей для каждого из цветовых каналов;

- для каждого пикселя полутонового изображения I^1 , полученного после выполнения предыдущих шагов, выполняется следующее преобразование, позволяющее улучшить разделение между порами и фоном:

$$I_{x,y}^2 = \left(I_{x,y}^1 \right)^{1-T_1+I_{x,y}^1}, \quad (30)$$

в результате чего формируется итоговое полутоновое изображение I^2 .

2. Выполняется бинаризация полутонового изображения I^2 с использованием порога T_2 (29).

В качестве наиболее информативного цветового канала в большинстве случаев рекомендуется выбирать красный.

Экспериментальные результаты были получены при обработке различных RGB снимков отпечатков поверхности покрытий на металлической подложке, полученных с целью вычисления пористости методом наложения, примеры которых представлены на рис. 1 а и рис. 3 а. Отпечаток поверхности покрытия, приведенный на рис 3 а, не был в достаточной мере промыт дистиллированной водой, что привело к возникновению зеленоватого фона (к сожалению, невидимый на рисунке) и потребовало в процессе бинаризации в качестве наиболее информативного выбрать зеленый цветовой канал вместо красного (как это было сделано для изображения на рис. 1 а).

Снимок, представленный на рис. 1 а, содержит размытия (слева и в правой верхней части изображения), примером чего является фрагмент, обведенный кружочком, который в увеличенном виде приведен на рис. 2 а. В результате повышения яркости и контраста исходного снимка (рис. 1 а) на основе применения предложенной в этой статье модели было получено изображение (рис. 1 б), на котором проблемных областей стало существенно меньше, в частности, размытие во фрагменте, обведенном кружочком, было удалено. В процессе бинаризации исходного изображения большая часть размытия в выделенной области была ошибочно интерпретирована в качестве пор (рис. 2 б). В то же время бинаризация обработанного изображения позволила повысить точность выявления пор в выделенном фрагменте (рис 2 в). В целом же после бинаризации для снимка, представленного на рис. 1 а, было получено на 15% больше черных пикселей, чем для изображения, приведенного на рис. 1 б.

Снимок, представленный на рис. 3 а, содержит небольшие размытия (верхняя часть изображения), а также отпечатки пор, которые трудноотличимы от фона, примером чего может служить фрагмент, обведенный кружочком. На рис. 4 а представлены результаты повышения яркости и контраста у исходного снимка (рис. 3 а). При сравнении гистограмм этих изображений (рис. 3 б и 4 б) становится очевидным, что в результате обработки максимум сдвинулся с 0.7-0.8 на 0.8-0.9, что свидетельствует о повышении яркости, а расширение пика гистограммы – о повышении контраста.

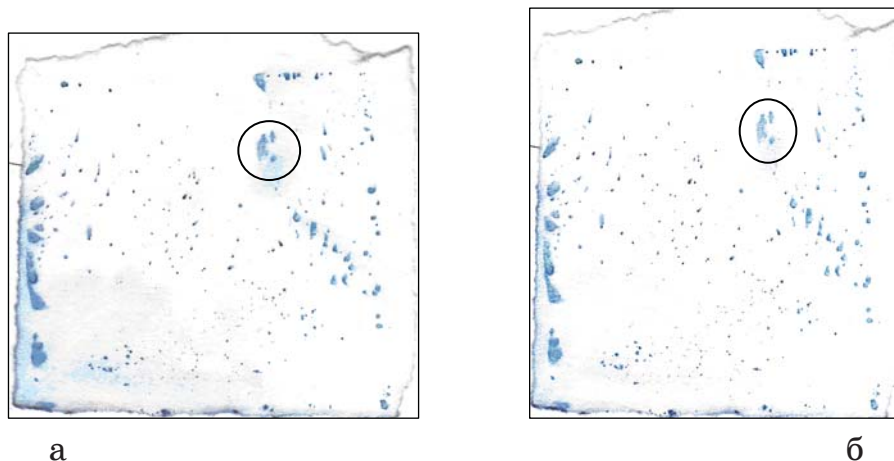


Рисунок 1 - Повышение яркости и контраста исходного RGB снимка:
а – исходное изображение; б – результат обработки

В процессе бинаризации фрагмента изображения, представленного на рис. 5 а (область на рис. 3 а, обведенная кружочком, в увеличенном виде), большинство из трудноразличимых пор не было выделено (рис. 5 б). В то же время бинаризация этого же фрагмента у обработанного изображения, приведенного на рис. 4 а, позволила выделить существенно большее количество трудноразличимых пор (рис. 5 в). В целом же после бинаризации для снимка, представленного на рис. 3 а, было получено на 8% меньше черных пикселей, чем для изображения, приведенного на рис. 4 а. Небольшой процент различия можно объяснить более точным выявлением пор в области размытия, что привело к уменьшению количества черных пикселей. В то же время повышение точности выделения трудноразличимых пор привело к увеличению числа черных точек. Хотя повышение точности на 8% не является существенным, однако при определении пористости различных фрагментов поверхности образца, приведенного на снимке (рис. 3 а), оно будет более значительным.

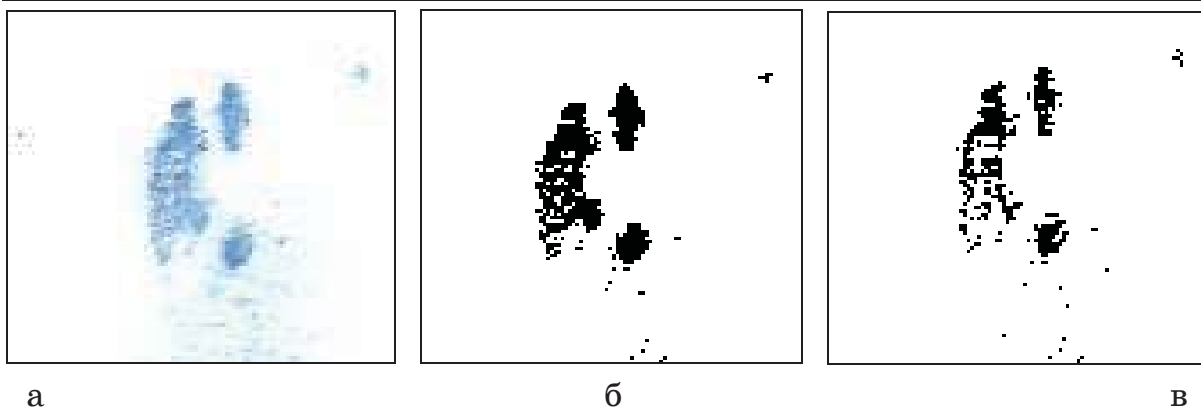


Рисунок 2 - Бинаризация выделенной области снимков, представленных на рис. 1: а – исходное изображение; результат бинаризации: б – исходного, в – обработанного изображений

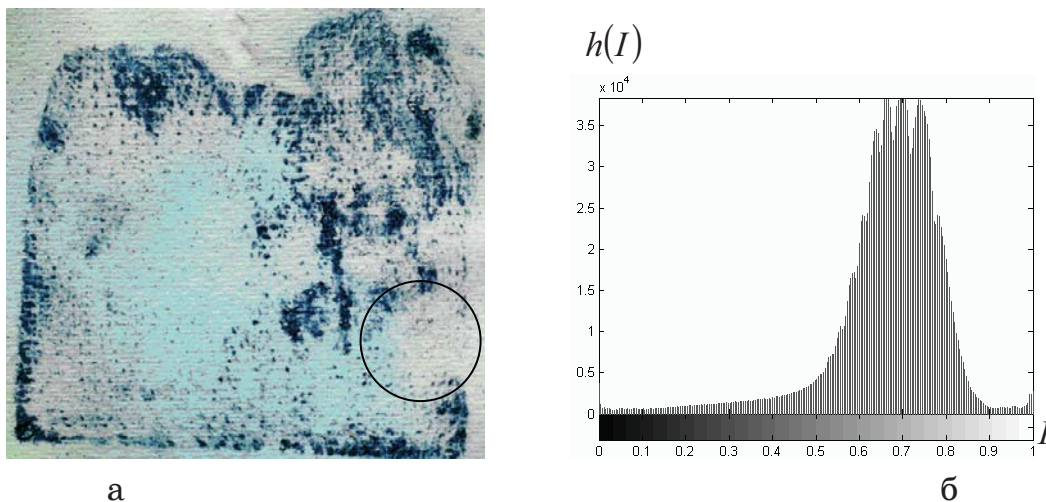


Рисунок 3 - RGB снимок отпечатка поверхности: а – исходное изображение; б – его гистограмма

Выводы. Усиление яркости и контраста снимков поверхности покрытий на металлической подложке на основе предложенной модели позволило повысить достоверность их бинаризации как за счет увеличения точности при обработке крупных скоплений пор, содержащих размытие, так и благодаря выявлению мелких одиночных пор. Достоинствами предлагаемого подхода является высокий уровень автоматизации процесса бинаризации (присутствует только один управляющий бинаризацией параметр – наиболее информативный цветовой канал, усиление яркости и контраста производится полностью автоматически), а также повышение ее достоверности. К недостаткам следует отнести высокую вычислительную сложность методов повышения яркости и контраста.

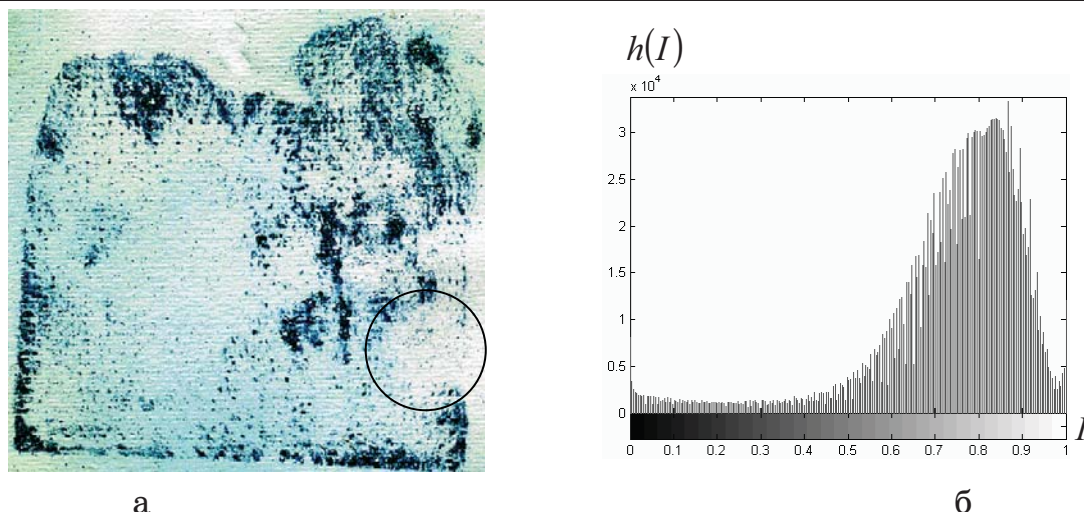


Рисунок 4 - Повышение яркости и контраста у снимка на рис. 3 а:
а – результаты обработки; б – гистограмма полученного изображения

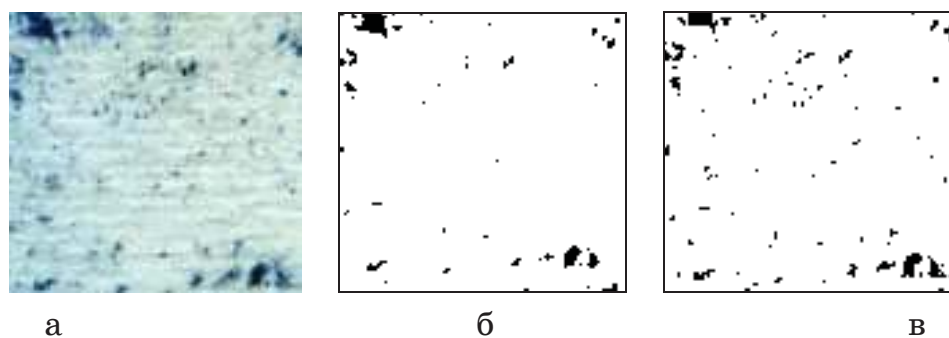


Рисунок 5 - Бинаризация выделенной области снимков, представленных на рис. 3 а и 4 а: а – исходное изображение; результат бинаризации: б – исходного, в – обработанного изображений

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении / Мельников П.С. – М.: Машиностроение, 1979. – 296 с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Гонсалес Р., Вудс Р.; [пер. с англ. под ред. П.А.Чочиа]. – М.: Техносфера, 2006. – 1070 с.
3. Егоров А.А. Метод адаптивного контрастирования мультиспектральных изображений для повышения достоверности нечеткой кластеризации / Егоров А.А. // Искусственный интеллект. – 2008. – № 3. – С. 306 – 314.
4. Егоров А.А. Метод адаптивного контрастирования мультиспектральных изображений для повышения достоверности нечеткой кластеризации / Егоров А.А. // Искусственный Интеллект. – 2009. – № 3 – С. 506 – 516.