

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 519.2

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ТРЕЩИН ТЕРМОУСТАЛОСТИ

И. В. Коноваленко, П. О. Марущак

*Тернопольский национальный технический университет им. Ивана Пулюя,
46001, Украина, г. Тернополь, ул. Русская, 56
E-mail: Maruschak.tu.edu@gmail.com*

Проанализировано влияние изменения главных параметров алгоритма на идентификацию трещин на изображениях роликов машин непрерывного литья заготовок. Рассмотрено влияние фонового порога бинарного преобразования и размера ядра фильтра на общую погрешность вычисления геометрических характеристик трещин. На основании экспериментально полученных данных вычислен диапазон длин трещин, при котором может использоваться разработанный алгоритм.

Ключевые слова: трещины термоусталости, идентификация, оптическая дефектometрия, геометрические характеристики.

Введение. Методы цифрового анализа позволяют получить экспресс-информацию об объекте и обеспечить оценку его технического состояния без остановки производства. Это особенно важно для металлургического оборудования, в частности для роликов машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), где неожиданные остановки не допускаются технологией производства, а время эксплуатации конструкции с трещинами составляет до 80 % общего ресурса [1].

Разработанный в Тернопольском национальном техническом университете им. Ивана Пулюя метод позволяет идентифицировать элементы сети трещин, определять количество трещинных фрагментов, их пространственную ориентацию, количество объединённых дефектов [2]. Рассмотрена общая структура программы для получения, обработки, анализа и документирования цифровых изображений с точки зрения оптической дефектometрии. Разработан и исследован алгоритм оценки положения трещин на ряде изображений контрольных участков ролика МНЛЗ. Описаны и проанализированы искажения, которые возникают на разных этапах обработки данных, и выявлены основные факторы, влияющие на точность измерений [2, 3].

Целью данной работы является создание алгоритма оценки точности идентификации элементов сети трещин термоусталости на основании анализа статистических характеристик погрешностей оценки положения трещин.

Краткое описание алгоритма и его главных параметров. Оценка положения трещины предусматривает бинаризацию исходного многоградационного изображения, фильтрование, повторную бинаризацию полученного изображения и его скелетизацию [4, 5]. В результате совокупности указанных операций получаем множество точек, описывающее геометрические параметры сети трещин на анализируемом изображении. При настройке алгоритма используется несколько параметров, отвечающих за правильность и точность вычисления положения искомых объектов — трещин. Рассмотрим основные шаги алгоритма и главные параметры, от которых зависят результаты его работы.

Бинаризация исходного изображения. Исходным является цветное изображение, полученное с фотокамеры (рис. 1). Для упрощения анализа оно приводится к чёрно-белому



Рис. 1. Исходное многоградационное изображение

виду с помощью адаптивной бинаризации, которая позволяет не только выделить зоны потенциальных объектов (трещин), но и частично устранить влияние неравномерности освещения при получении изображения. При этом для каждого пикселя в окрестности некоего радиуса строится гистограмма распределения яркости, для исследованных изображений она имеет выраженный бимодальный вид (рис. 2). Две вершины на гистограмме указывают, что изображение содержит два разных по яркости множества точек: одно из них (меньший пик) представляет объекты — трещины, а другое (больший пик) — фон.

С помощью анализа гистограммы определяем порог яркости бинарного преобразования, разбивающий изображение на фон и трещины. Для этого находим на ней максимальное значение функции распределения яркости фона I_{\max} и рассчитываем N_{\max} — количество точек с яркостью, большей I_{\max} . После этого на гистограмме (на стороне, не принадлежащей к области, соответствующей трещине) находим такое минимальное значение яркости I_p , для которого будет выполняться условие

$$N_p \geq LN_{\max}/100 \%, \quad (1)$$

где N_p — количество точек с яркостью, большей I_p ; L — относительный фоновый порог (в процентах).

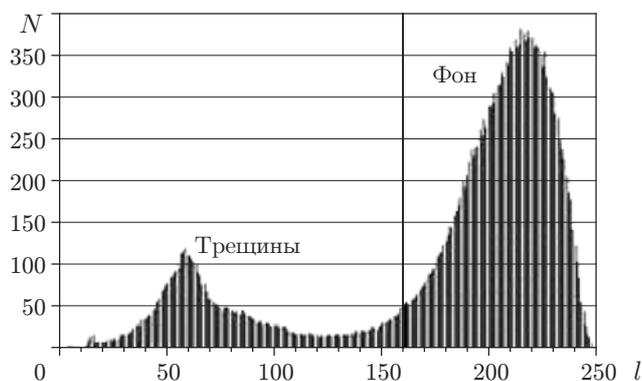


Рис. 2. Типичный вид гистограммы распределения яркости для участка изображения в окрестности произвольной точки

Тогда предельное значение яркости I_L , разделяющее объект и фон, рассчитаем по формуле

$$I_L = I_{\max} - K_L(I_p - I_{\max}), \quad (2)$$

где $K_L = 1,8$ — коэффициент, полученный эмпирическим путём.

Фоновый порог бинарного преобразования — важный параметр, существенно влияющий на результат выделения на изображении объектов. Неправильный выбор этого параметра может привести к тому, что часть объектов будет принята за фон или будут найдены «фантомные» объекты, которые на самом деле являются частью фона. Изменение порога бинарного преобразования вызывает смещение края найденных на изображении объектов на величину W_L (рис. 3, *a*), вследствие чего могут частично изменяться геометрические характеристики трещин, вычисленные алгоритмом.

Результатом преобразования является монохромное изображение исследуемой поверхности. Оно содержит базовую информацию о размещении искомых потенциальных объектов, однако на нём присутствует значительное количество шумовых элементов, усложняющих процесс вычисления положения трещин и в определённой мере искажающих общую картину растресканной поверхности. Кроме того, из-за сложной топологии трещин их изображение часто содержит большое количество не связанных между собой фрагментов, которые также затрудняют процесс локализации элементов трещин.

Фильтрация и повторная бинаризация. Вследствие особенностей получения исследуемых образцов растресканной поверхности послойным сошлифовыванием на них присутствует значительное количество концентрических элементов шероховатости. При неравномерном освещении они приводят к появлению на исходных изображениях тонких посторонних объектов, которые должны быть исключены из дальнейшего рассмотрения.

Для уменьшения влияния шумовых элементов (присутствующих после бинаризации исходного многоградационного изображения) и объединения разрозненных фрагментов трещины в единый объект применена операция фильтрации с последующим повторным бинарным преобразованием отфильтрованного изображения.

Фильтрация выполняется в два этапа: сначала применяется дискретный гауссовский фильтр, потом полученное изображение улучшается путём свёртывания с фильтром для



Рис. 3. Влияние главных параметров алгоритма на результат оценки положения трещин: *a* — смещение края объекта на расстояние W_L , вызванное изменением фонового порога; *b* — процесс объединения отделённых фрагментов трещины под воздействием размера ядра фильтра

выделения контрастности изображения. Гауссовский фильтр эффективно заглушает шумы и размывает края объектов изображения, обеспечивая их слияние. Контрастный фильтр позволяет усилить резкость краёв объектов отфильтрованного изображения за счёт подчёркивания различий интенсивности между соседними пикселями. Яркость каждой точки полученного таким образом изображения пропорциональна количеству расположенных в его окрестности нефоновых элементов.

Элементы квадратного ядра гауссовского фильтра размером $(2h_F + 1) \times (2h_F + 1)$ вычисляются по формуле [6]

$$H_{ij} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(i - h_F - 1)^2 + (j - h_F - 1)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где σ — среднеквадратическое отклонение гауссиана.

Размер ядра фильтра (рис. 3, *b*) влияет на процессы «отсеивания» фоновых пикселей и объединения разрозненных фрагментов трещин, поэтому его изменение может привести к другому результату.

Для конечного выделения трещин используется повторная бинаризация отфильтрованного изображения. После указанных преобразований имеем окончательное изображение, которое описывает картину растрескивания на исследуемой поверхности (рис. 4, здесь фону соответствуют белые пиксели, а трещинам — чёрные).

Скелетизация. Полученное в результате указанных преобразований изображение содержит информацию о форме и площади трещин, однако не может непосредственно использоваться для определения таких количественных параметров, как число трещин, их длина, наклон и т. п.

Для аппроксимации совокупности пикселей, которые формируют найденные объекты-трещины, более простым набором точек проводится скелетизация [4, 7]. Она позволяет выделить каркасные линии трещин путём выявления на изображении срединных линий толщиной в 1 пиксель. На этих линиях выделяем совокупность опорных точек (рис. 5), множество которых описывается двунаправленными графами \mathbf{P}_{GI} ($I \in (1 \dots N_G)$, где N_G — количество графов, соответствующее количеству «объединённых трещин») [3]. Рёбра этих графов указывают на связь между определёнными точками. Каждый граф \mathbf{P}_{GI} содержит информацию о фрагментах трещин, соединяющих смежные точки. Опорные точки средин-

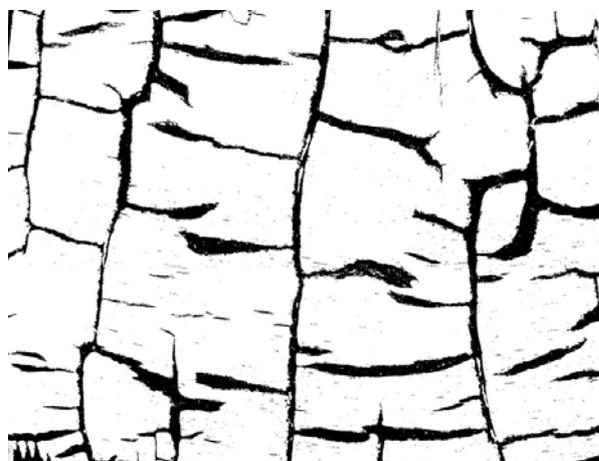


Рис. 4. Бинаризованное изображение растресканной поверхности (фрагмент)



Рис. 5. Конечное изображение с выявленными трещинами и сеткой опорных точек (фрагмент)

ных линий являются конечным набором данных, на основании которого делается вывод о положении, направлении распространения и длине трещины [5].

Анализ трещин. После определения сети опорных точек в автоматизированном режиме их объединяют в трещины. При этом все графы \mathbf{P}_{GI} могут быть разбиты на определённое количество меньших графов, каждый из которых описывает отдельную трещину (фрагмент объединённой трещины). В результате таких преобразований имеем совокупность двунаправленных графов, описывающих отдельные трещины, а каждая трещина представлена набором прямолинейных фрагментов — рёбер графа.

Операции этого этапа алгоритма основаны на результатах предыдущих этапов и контролируются оператором, а значит собственной погрешности в вычисление геометрических параметров трещин не вносят.

Исследование влияния главных параметров алгоритма на результат оценки положения трещин. Рассмотренные параметры алгоритма (фоновый порог адаптивного бинарного преобразования и размер ядра фильтра) оказывают непосредственное влияние на положение каркасных (срединных) линий, поэтому важным является вопрос оценки их влияния на точность определения распознанных трещин. Оценивание проводили при изменении их величины в заданном диапазоне значений в процессе работы алгоритма. В связи с этим для каждой группы параметров (h_F и L) фиксировали массив координат точек \mathbf{P} , которые формируют каркасную линию. Полученные таким образом массивы \mathbf{P} использовались для установления смещения пикселей каркасных линий в зависимости от значений оцениваемых параметров алгоритма (рис. 6).

Как показали исследования, другие параметры алгоритма незначительно влияют на результат вычисления положения трещин. В общем случае совокупная погрешность ξ нахождения положения произвольной точки каркасной линии, обусловленная настройкой параметров алгоритма, не превышает значения

$$\xi \leq \xi_L + \xi_h, \quad (4)$$

где ξ_L — погрешность настройки фонового порога; ξ_h — погрешность, обусловленная смещением точки при настройке размера ядра фильтра.

Для оценки влияния изменения указанных параметров алгоритма на величину смещения точек каркасной линии значение относительного фонового порога L изменялось в пределах 10–30 %, а размер ядра фильтра h_F — от 5 до 15 пикселей. При этом для каждого набора значений параметров фиксировалось своё множество опорных точек $\mathbf{P}^\mu(L, h_F)$, где



Рис. 6. Смещение каркасной линии при изменении параметров алгоритма

$\mu \in (1 \dots N)$, а N — количество исследованных комбинаций параметров L и h_F . Чтобы вычислить величину смещения каркасной линии, для каждой точки множества $\mathbf{P}^{\mu 1}(L, h_F)$ находили ближайшую точку массива $\mathbf{P}^{\mu 2}(L, h_F)$, полученного при другой комбинации значений (L, h_F) , и определяли расстояние между ними. В результате таких расчётов получена совокупность множеств $\delta^\mu(L, h_F)$, которые характеризуют смещение точек каркасной линии. Каждый элемент δ_i^μ равен расстоянию от точки $\mathbf{P}_i^{\mu 1}$ до ближайшей точки $\mathbf{P}_j^{\mu 2}$:

$$\delta_i^\mu = |\mathbf{P}_i^{\mu 1} \mathbf{P}_j^{\mu 2}|. \quad (5)$$

Однако изменение параметров алгоритма вызывает не только смещение каркасных линий, в незначительной мере будет меняться и сам их рисунок: некоторые фрагменты могут исчезать, а некоторые — появляться. Поэтому не для каждой точки множества $\mathbf{P}^\mu(L, h_F)$ можно найти соответствующую точку после изменения параметра алгоритма, следовательно, совокупность $\delta^\mu(L, h_F)$ будет содержать грубые погрешности (промахи), которые нельзя использовать для оценки влияния параметров алгоритма на точность определения каркасной линии.

Чтобы обеспечить однородность выборки и удалить из неё промахи, обусловленные влиянием посторонних факторов, выполнялось цензурирование выборки путём использования критерия Райта [8]. При этом из совокупности значений $\delta^\mu(L, h_F)$ удалялись те, для которых выполнялось условие $|\xi_i - \bar{\xi}| \geq 3S_\xi$ ($\bar{\xi}$ — среднее значение, S_ξ — стандартное отклонение выборки).

Гистограмма распределения рассчитанных смещений $\delta^\mu(L, h_F)$ для изображения (см. рис. 1) при изменении размера ядра фильтра от 5 до 7 пикселей и постоянном значении фонового порога 20 % показана на рис. 7. Видно, что преобладающее количество точек смещается незначительно (всего на несколько пикселей).

Исследование группы из 10 изображений показало, что при постоянном фоновом пороге $L = 20\%$ и изменении ядра фильтра h_F от 5 до 15 пикселей стандартное отклонение выборки колеблется в пределах 1,6–7,9 пикселя (рис. 8, *a*), а среднее значение смещения составляет 1,0–5,3 пикселя. При этом наблюдается чёткий тренд: увеличение размера ядра пропорционально влияет на смещение каркасных линий трещин. Несколько более сложной является зависимость смещения от изменения относительного фонового порога (рис. 8, *b*). По результатам исследований при постоянном размере ядра $h_F = 5$ пикселей и изменении L от 10 до 30 % стандартное отклонение колеблется в пределах 1,4–8,0 пикселя. Среднее

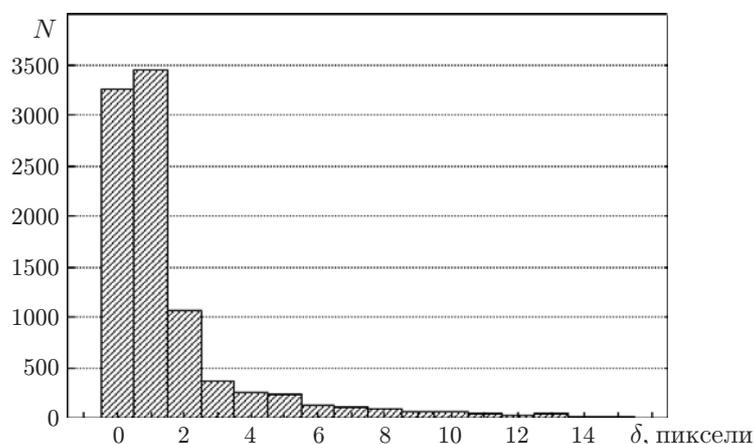


Рис. 7. Гистограмма распределения смещений точек каркасной линии трещины при изменении параметров алгоритма

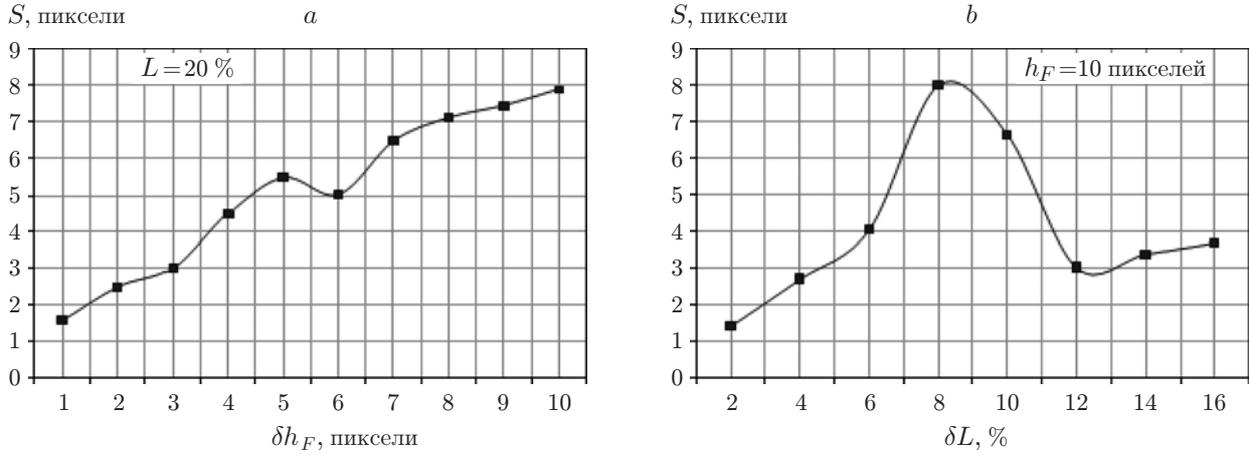


Рис. 8. Изменение стандартного отклонения выборки смещений каркасных линий при изменении ядра: фильтра (а) и фонового порога (b)

значение смещения находилось в пределах 0,8–4,2 пикселя, а максимальное смещение — 9,5–42,4 пикселя. Действие фонового порога на смещение каркасной линии является более сложным, поскольку его изменение по-разному будет воздействовать на различные части изображения. Кроме того, фоновый порог влияет на значительно большее количество пикселей, чем фильтр, поскольку при его изменении часть пикселей может вообще исключаться из дальнейшего рассмотрения или же, наоборот, привлекаться к анализу.

Для обнаружения влияния изменения каждого из исследованных параметров алгоритма на конечный результат — геометрические параметры сети трещин — проведён ряд экспериментов, в которых фоновый порог варьировался в пределах 10–30 %, а размер ядра фильтра — от 5 до 15 пикселей. При этом фиксировались такие исходные данные анализа, как матрица распределения углов наклона трещин и матрица их длин. Матрица углов наклона строилась на основании диаграммы распределения углов [2], учитывающей долю общей длины всех прямолинейных фрагментов, наклон которых находится в определённом диапазоне. Матрица углов, построенная на основании множества $\mathbf{P}^\mu(L, h_F)$, показывает распределение длин трещин в зависимости от значения угла наклона и имеет вид

$$A^\mu = \begin{bmatrix} \alpha_i & \alpha_i + \delta\alpha & l_i \\ \alpha_{i+1} & \alpha_{i+1} + \delta\alpha & l_{i+1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \alpha_n & \alpha_n + \delta\alpha & l_n \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где α_i — начальный угол диапазона; $\delta\alpha$ — размер диапазона ($\alpha_{i+1} \rightarrow \alpha_i + \delta\alpha$); l_i — суммарная длина трещин, попадающих в диапазон $[\alpha_i; \alpha_{i+1})$; n — количество диапазонов углов.

Матрица длин содержит совокупность длин трещин, выявленных на изображении:

$$L^\mu = [\lambda_i \ \lambda_{i+1} \ \dots \ \lambda_m], \quad (7)$$

где λ_i — длина отдельной трещины, m — количество трещин.

Исследования показали, что изменение параметров алгоритма влияет на вычисленные значения углов наклона трещин незначительно. Это объясняется приблизительно симметричным относительно оси трещины расширением (или сужением) её краёв, поэтому наклон полученной после скелетизации срединной линии изменяется мало. Анализ образцов

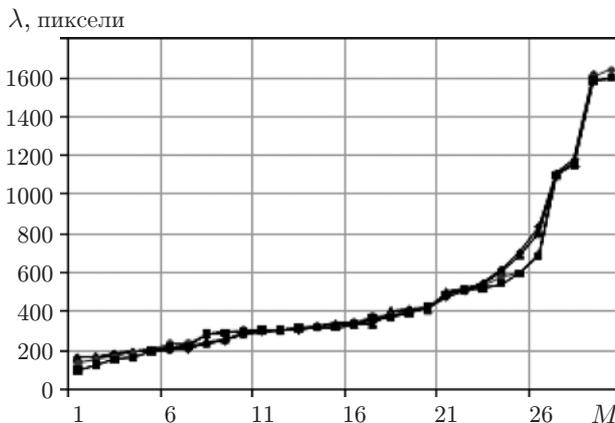


Рис. 9. Графики длин найденных трещин λ для разных значений параметров алгоритма: при $h_F = 5$ пикселей, $L = 20\%$ (\blacklozenge); $h_F = 10$ пикселей, $L = 10\%$ (\blacktriangle); $h_F = 10$ пикселей, $L = 30\%$ (\bullet); $h_F = 15$ пикселей, $L = 20\%$ (\blacksquare)

растресканной поверхности показал, что разброс общей длины всех прямолинейных фрагментов трещин, попадающих в произвольный угловой диапазон, не превышал 3,5 % от среднего значения.

Несколько по-другому изменение параметров алгоритма влияет на вычисление длины трещины. На рис. 9 приведены графики, демонстрирующие изменение длин трещин для изображения на рис. 1 при четырёх крайних значениях границы фона и размера ядра фильтра. Для наглядности трещины упорядочены по возрастанию длин, M — их порядковый номер. Полученные результаты показывают, что для разных изображений в исследованном диапазоне значений параметров алгоритма отклонение длины от среднего значения находится в пределах 0–89 пикселей. С доверительной вероятностью 95 % отклонение не превышает 71 пиксель. При этом величина погрешности определения длины трещины слабо связана с длиной, так как определяется, прежде всего, характеристиками изображения (освещённость, контрастность и т. п.). Природа влияния параметров алгоритма на вычисление длины заключается в том, что на торцах трещина в зависимости от значений h_F и L будет сжиматься (или растягиваться), поскольку часть пикселей по её краям может удаляться из рассмотрения. На рис. 10 показан график изменения относительной погрешности определения размера трещины в зависимости от её длины. Таким образом,

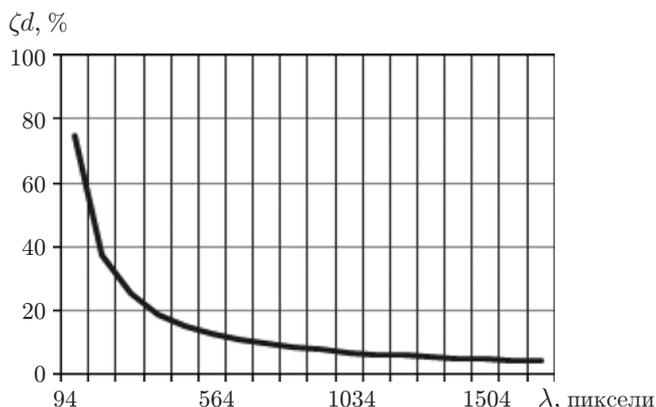


Рис. 10. График относительной погрешности определения длины трещины λ

для трещин длиной больше 250 пикселей относительная погрешность определения длины (для использованного способа получения изображения) не превышает 25 %. В то же время зависимость величины уменьшения краёв трещины от значений параметров алгоритма можно в некоторой мере предусмотреть, разработав шкалу компенсации. Однако это тема отдельного исследования.

Заключение. В представленной работе описан алгоритм цифровой дефектометрии, предназначенный для идентификации элементов сетки трещин термоусталости, и исследовано воздействие его главных параметров на результат измерения геометрических характеристик трещин: координат, длин и углов наклона. Рассмотрено влияние фонового порога бинарного преобразования и размера ядра фильтра на общую погрешность вычисления геометрических характеристик трещин. Полученные результаты позволяют выбрать такую комбинацию параметров алгоритма, при которой общая погрешность будет минимальной. Установлено, что на вычисление угла наклона трещин изменение параметров алгоритма влияет незначительно.

Методом статистической обработки результатов измерений вычислена величина смещения координат трещин в результате изменения параметров алгоритма. На основании экспериментально полученных данных рассчитан диапазон длин трещин, при котором может использоваться разработанный алгоритм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Yasniy P., Maruschak P., Lapusta Y. et al.** Thermal fatigue material degradation of caster rolls' surface layers // *Mech. Adv. Mat. and Struct.* 2008. **15**, Is. 6–7. P. 499–507.
2. **Yasnii P., Marushchak P., Konovalenko I., Bishchak R.** Computer analysis of surface cracks in structural elements // *Mater. Sci.* 2008. **44**, N 6. P. 833–839.
3. **Марущак П. О., Коноваленко И. В.** Измерение деформации материалов путём анализа цифровых изображений поверхности // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2010. № 6. С. 55–61.
4. **Yasniy P., Maruschak P., Konovalenko I. et al.** Multiple cracks on continuous caster rolls surface: A three-dimensional view // *Proc. of the 4th Intern. Conf. "Processing and Structure of Materials"*. Palic, Serbia, 2010. P. 7–12.
5. **Yasnii P., Marushchak P., Konovalenko I., Bishchak R.** Structural degradation and damage caused by a system of cracks to the steel of metallurgical equipment // *Mater. Sci.* 2009. **45**, N 6. P. 40–44.
6. **Форсайт Д., Понс Ж.** Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
7. **Прэтт У.** Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Кн. 1. 312 с.
8. **Третьяк Л. Н.** Обработка результатов наблюдений. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. 171 с.

Поступила в редакцию 8 февраля 2011 г.