

УДК 669.002.56; 669:658.562

Л.И. Криволапова, О.А. Кравцова, С.В. Соколов

## Фрактальная размерность – оценочная мера качества поверхности металлопроката

Раскрыта целесообразность применения понятий и методов теории фракталов в практике оценивания качества поверхности металлопродукции. Конкретизирована оценочная мера качества поверхности металлопроката – фрактальная размерность контуров наружных дефектов металлоизделий. Предложена многоканальная структура алгоритма определения показателя фрактальной размерности контуров дефектов поверхности металлопроката.

**Ключевые слова:** фрактальная размерность, поверхностный дефект металлопроката, многоканальная структура.

Обширные исследования по изучению влияния многообразия факторов на качество поверхности и макроструктуры готовой металлопродукции, постоянные поиски оптимальных технологических решений по управлению непрерывной разливкой стали способствовали внедрению в состав действующей технологии новых улучшающих качество слитков процессов-операций: обеспечение полного контакта оболочки слитка со стенками кристаллизатора; осуществление «мягкого» регулируемого обжата оболочки слитка и динамического изменения режимов вторичного охлаждения; приготовление специальных композиций шлакообразующих смесей [1].

Однако, несмотря на достигнутые успешные результаты, проблема получения бездефектной непрерывно-литой металлопродукции приобретает особую актуальность в связи со следующими обстоятельствами:

- наличием глубокой связи между стадиями и механизмами пластической деформации макроструктуры и рельефа поверхности слитков;
- трансформацией возникших ранее наружных и внутренних дефектов (например, разнообразные трещины, осевая рыхлость) непрерывно-литых слитков, при последующей обработке последних, в плены, волосовины, участки осевой рыхлости и ликвации и т.д. (рис. 1);
- малой эффективностью применяемых в производстве трудоемких визуального и ультразвукового способов контроля качества металлопродукции; без дополнительной обработки металлоизделий визуально обнаружить можно только грубые наружные трещины, «пояса», крупные шлаковые включения, мелкие трещины и неметаллические включения невидимы под слоем окалины.

Последнее обстоятельство подтверждает целесообразность разработки и применения принципиально новых методов контроля качества поверхности металлоизделий с учётом современных научных достижений материаловедения [2].

С позиции неразрушающего контроля качества металлопродукции перспективным является использование теории фракталов, фрактального анализа для разработки способов оценивания качества поверхности металлопродукции с целью обнаружения нежелательных структурных изменений (дефектов) поверхности и макроструктуры металлопродукции на стадиях непрерывной разливки и последующей обработки непрерывно-литых слитков. Проведенные авторами [3] исследования по параметризации поверхностных деформационных субструктур на модельных броуновских изображениях поверхности показали «преимущество фрактального вейвлет-анализа как наиболее эффективного инструмента анализа изображений» в сопоставлении с другими методами. Новое решение задачи обработки сложных изображений, основанное на использовании фрактальных параметров сигналов (фрактальной размерности и фрактальных сигнатур), представлено в [4].

Впервые с использованием теории фракталов применительно к производству металлопроката разработан способ оценивания качества поверхности непрерывно-литой металлопродукции, детальное изложение сути которого приведено в [5]. Концептуальную основу предлагаемого способа оценивания качества поверхностных и внутренних структур металлопроката составляют представление о дефекте металлопроката как о «статическом объекте, имеющем природу «отклика» на некоторое воздействие», и представление о фрактальных свойствах структуры металлов и их сплавов [2].

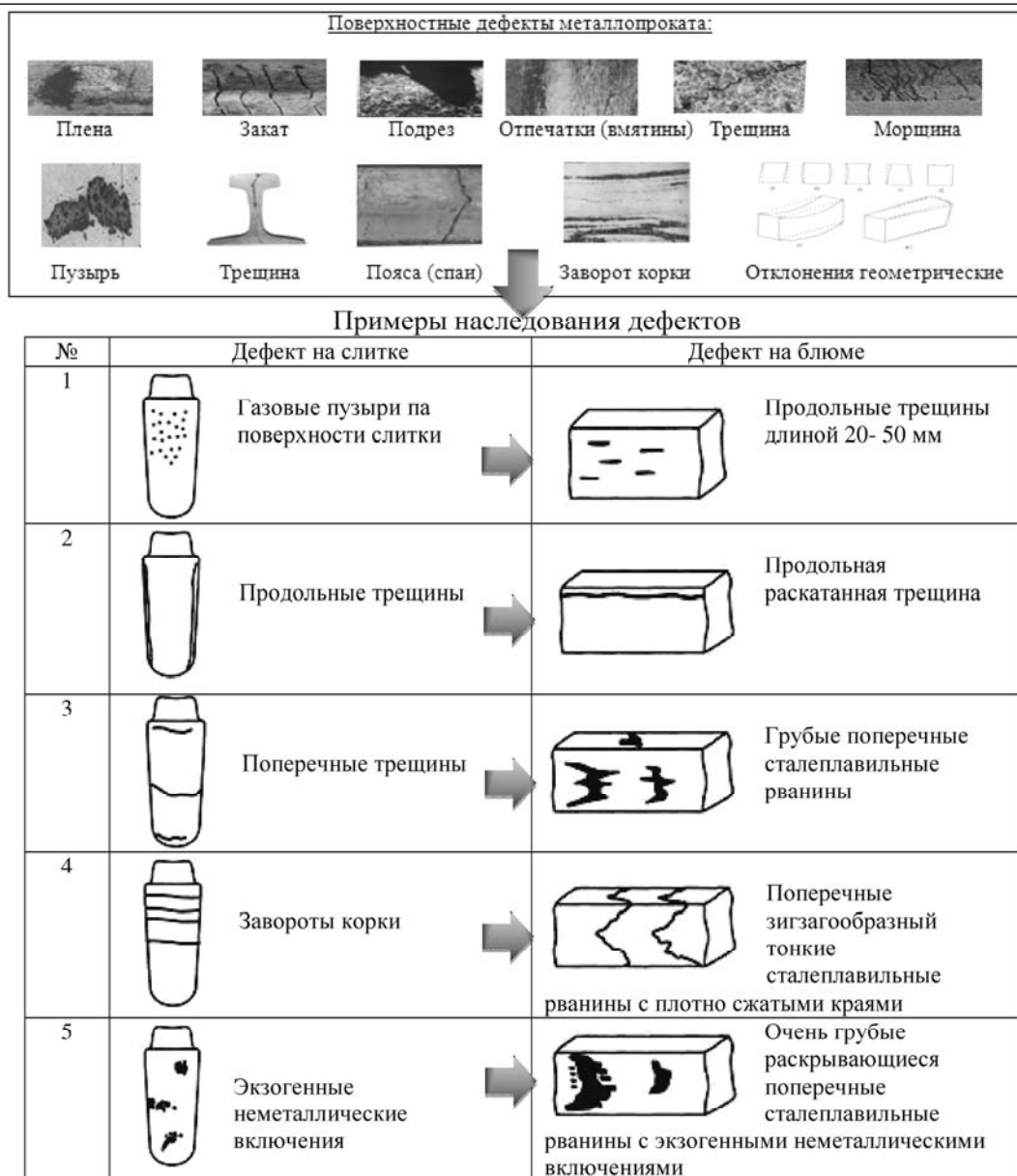


Рис. 1. Типовые поверхностные дефекты металлопроката и примеры наследования дефектов

### Описание базового метода оценивания качества поверхности металлопроката

Отличительными особенностями рассматриваемого способа [5] от существующих методов контроля качества металлопродукции являются:

- предоставляется возможность создания вполне реализуемой автоматизированной системы оперативного обнаружения дефектов металлоизделия на стадиях непрерывной разливки металла и последующей обработки слитка;
- непосредственная реализуемость алгоритма предлагаемого способа в составе математического обеспечения автоматизированной системы оперативного контроля качества поверхности металлоизделий;
- одновременное формирование горизонтальных видеоизображений поверхности и «вертикальных» видеоизображений срезов контролируемой металлопродукции с целью получения более четкого изображения изломистых контуров выявленных поверхностных дефектов и конкретизации координат и особенностей внутренних дефектов металлопроката. Для получения видеоснимков «вертикальных» сечений используются сканирующие микроскопы «GX-71» и система анализа изображений «SIAMS PHOTOLAB». Формирование «вертикальных» видеоснимков осуществляется по результатам фиксации сканирующими микроскопами расстояния до контролируемой поверхности металлоизделия (с двух сторон). Основная задача системы – обеспечение достаточного набора дан-

ных для получения результатов металлографического исследования. Система анализа изображений «*siams photolab*» представляет собой программный продукт, состоящий из отдельных программных модулей, которые предназначены для проведения обработки и анализа изображений, полученных при помощи цифровых и аналоговых фото- и видеокамер, а также сканеров, используемых для проведения микро- и макросъемки;

– обработка полученных видеоизображений осуществляется в реальном времени;

Суть этого способа оценивания качества поверхности металлопроката кратко отражена в представленной на рис. 2 его блок-схеме.

Пояснения к основным блокам функциональной схемы:

- получение изображений металлографических структур: металлопрокат, поступающий на стеллаж, с помощью устройств, позволяющих проводить фиксацию быстро движущихся высокотемпературных поверхностей, подвергается видеосъемке как по горизонтали, так и по вертикали (видеоснимки в «вертикальной» проекции соответствуют секущим плоскостям); полученные снимки поступают на устройство распознавания микроструктуры фиксируемого объекта и далее через коммутатор видеовхода на рабочую станцию, частота получения видеокадров определится в зависимости от требований, предъявляемых к марке контролируемого металлопроката по ГОСТу;



Рис. 2. Блок-схема способа оценивания качества поверхности металлопроката

- предварительная обработка: изображения, поступившие с микроскопа, подвергаются изменению контрастности, сглаживанию шумов, подчеркиванию границ и переводу полученных на «вертикальных» видеоснимках граничных изломистых линий сечений сканируемой поверхности метал-

лопроката во временные ряды данных  $x(l)$ , где  $x(l)$  – текущее значение данного во временном ряде  $l = \overline{1;L}$ ;

- определение координат местоположения дефекта: задается величина скользящего интервала данных  $[\alpha; \beta]$ , в несколько раз меньшего, чем объем данных анализируемого временного ряда данных, который разбивается на равные подынтервалы  $\omega_m = [\alpha = l_0 < l_1 < \dots < l_m = \beta]$ ,  $m = 2, \dots, M$ , где  $m$  – число данных в подынтервале; затем на каждом разбиении определяется сумма разностей между максимальным и минимальным значениями данных в рамках каждого подынтервала:

$$A_n(l) = \sum_{\omega_m=1}^m \left( x(l)_m^{\max} - x(l)_m^{\min} \right),$$

где  $x(l)_m^{\max}$ ,  $x(l)_m^{\min}$  – максимальное и минимальное значения в  $\omega$ -й подынтервал,  $\frac{[\alpha; \beta]}{m}$  – число подынтервалов при конкретном  $m$  в  $n$ -м разбиении,  $n$  – порядковый номер разбиения заданного интервала  $[\alpha; \beta]$  на подынтервалы; далее по данным о накопленных суммах  $A_n(l)$  с помощью метода наименьших квадратов определяются параметры ( $a$  и  $b$ ) уравнения регрессии:  $y = ax + b$ , необходимые для конкретизации динамического индекса вариации в текущий момент времени, который отождествляется по следующему правилу:  $\mu(l) = -a_l$ ; перемещаясь на одно данное вдоль конкретного анализируемого временного ряда «вертикального» среза объекта, процедура получения значения динамического индекса вариации  $\mu(l)$  повторяется в динамическом режиме до последнего данного анализируемого временного ряда по описанной выше схеме; определение координат поверхностного дефекта металлопроката осуществляют по местоположению «вертикального» поперечного среза объекта, которому соответствовал анализируемый временной ряд данных, и моменту изменению знака динамического индекса вариации на противоположный, что свидетельствует об изменении структуры анализируемого временного ряда данных и соответственно о локальном изменении поверхностной структуры металлопроката; совокупность полученных координат конкретизирует контур поверхностного дефекта;

- расчет фрактальной размерности: по совокупности полученных координат формируется контур дефекта с последующим разбиением его на составляющие части (например, две части – верхняя и нижняя), по данным каждой части рассчитывается значение фрактальной размерности по выражению:  $D_\mu = \mu + 1$ , где  $\mu$  – определяется по приведенной выше схеме при однократном формировании подынтервалов; определение показателя фрактальной размерности целостного замкнутого контура выявленного поверхностного дефекта металлопроката осуществляется по формуле  $D_\mu = \frac{1}{2}(D_{\mu v} + D_{\mu n})$ , где  $D_{\mu v}$ ,  $D_{\mu n}$  – значения фрактальной размерности для верхней и нижней изломистой линии замкнутого контура выявленного поверхностного дефекта соответственно;

- конкретизация типа поверхностных дефектов по значению  $D_\mu$  по эталонной шкале дефектов, включающей виды поверхностных дефектов, максимально допустимые геометрические размеры устранимых дефектов и соответствующие типам дефектов значения фрактальной размерности контуров. В случае если фрактальная размерность вновь выявленного дефекта превышает фрактальную размерность устранимых дефектов, делается вывод о типе дефекта и возможности его устранения;

- представление информации на рабочей станции об обнаруженных дефектах и их местоположении; при этом различным цветом выделены устранимые и неустранимые дефекты.

Однако, не изменяя сути рассматриваемого способа оценивания качества поверхности металлопроката, для оперативного обнаружения поверхностных дефектов металлопроката на ранних стадиях его производства необходимо существенно повысить быстродействие алгоритма определения показателей фрактальной размерности контуров выявляемых дефектов.

В данном способе оценивания качества поверхности вычислительные процедуры: определение разностей между максимальными и минимальными значениями данных в подынтервалах, расчет накопленных сумм  $A_n(l)$  в блоках 4 и 5 блок-схемы (рис. 2) и выделение отдельных составляющих контура – осуществляются при помощи программного модуля системы, в котором, используя про-

цедуру *thread*, осуществляется разделение главного «потока» обрабатываемой информации (информация по всему контуру дефекта) на отдельные «нити» (информация по составляющим частям контура) и последующую обработку проводить с использованием операции «многонитивости» (распараллеливания). На рис. 3 приведена блок-схема многоканальной структуры алгоритма определения показателя фрактальной размерности контура дефекта металлоизделий.

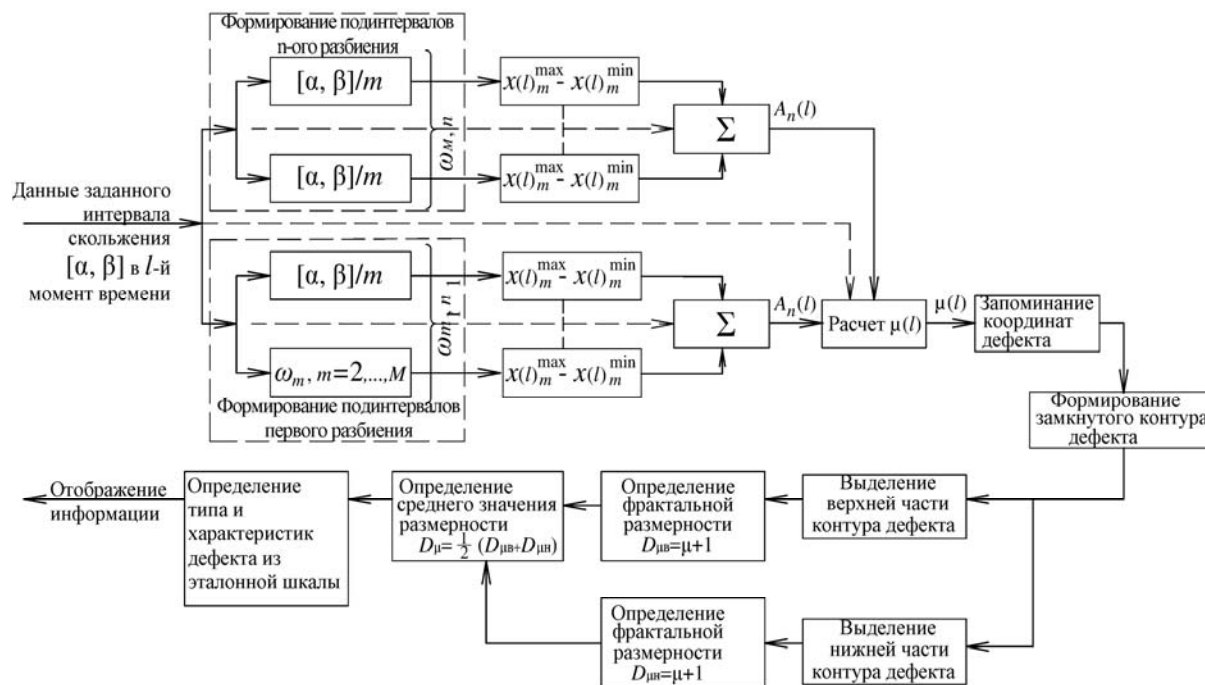


Рис. 3. Блок-схема многоканальной структуры алгоритма определения показателя фрактальной размерности контура дефектов металлоизделий

Использование параллельных вычислительных процедур в алгоритме расчета показателей фрактальной размерности изломистых линий контуров поверхностных дефектов металлоизделий дает сокращение времени выявления дефекта на 33,3% по сравнению с последовательным алгоритмом (при двух подынтервалах разбиения), в случае увеличения числа подынтервалов время на обработку уменьшается пропорционально их увеличению. Уменьшение временных затрат на оценивание качества поверхности и макроструктуры металлопродукции способствует своевременному принятию управленческих технологических решений и улучшению качества готового изделия, так как разрабатываемая система диагностики качества поверхности металлопроката должна начинать функционировать непосредственно с стадии разлива слитков. Если контроль качества металла будет осуществляться сразу по выходу металла из кристаллизатора, и будет информация о зародившихся дефектах, а большинство дефектов зарождаются в кристаллизаторе, то в зоне вторичного охлаждения можно оперативно изменять режим охлаждения или применить процедуру мягкого обжата, что уменьшит последующую трансформацию дефекта и позволит провести его зачистку. Неустранимость дефекта являются основанием для перевода контролируемой продукции в более низкую категорию качества или она направляется на вырезку дефектных участков для определения причины его возникновения.

#### Литература

1. Куклев А.В. Практика непрерывной разливки стали / А.В. Куклев, А.В. Лейтес. – М.: Металлургиздат, 2011. – 428 с.
2. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. – М.: Наука, 1994. – 382 с.
3. Методы фрактальной параметризации поверхностных деформационных субструктур / Л.А. Битюцкая, П.В. Кузнецов, Е.В. Богатиков // Нелинейный мир (Москва). – 2005. – Т. 3, № 3. – С. 202–2012.

4. О методах измерения фрактальной размерности и фрактальных сигнатур многомерных стохастических сигналов / А.А. Потапов, В.А. Герман // Радиотехника и электроника. – М. – 2004. – Т. 49, № 12. – С. 1468–1491.

5. Патент № 2483295 РФ, МПК С2 G01N 21/892, В21В 38/00 Способ диагностирования качества поверхностной структуры металлопроката / А.Б. Юрьев, К.В. Волков, Л.И. Криволапова и др. (РФ). – № 2 011 103 755 / 28; заявл. 02.02.2011; опубл. 27.05.2013, Бюл. №15.

---

**Криволапова Людмила Ивановна**

Канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербург

Тел.: 8-960-257-00-94

Эл. почта: ludak\_45@mail.ru

**Кравцова Ольга Александровна**

Канд. техн. наук, доцент каф. технологического обучения и автоматизации производственных процессов Новокузнецкого института (филиала) Кемеровского государственного университета

Тел.: 8-904-993-02-23

Эл. почта: kravtsova\_oa@kuz.ru

**Соколов Сергей Валерьевич**

Ведущий программист Кузнецкого металлургического техникума, Новокузнецк

Тел.: 8-961-703-29-92

Эл. почта: sv-sokolov@mail.ru

Krivolapova L.I., Kravtsova O.A., Sokolov S.V.

**Fractal dimension – an estimated quality measure of a surface of metal rolling**

The article considers the prerequisites to development of the automated system of diagnostics of surface structure of metal rolling. The function chart of quality estimation of metal rolling surface with use of fractal dimension of the marked-out defect contour is given. We propose the multichannel structure of the algorithm for determining the fractal dimension index of defects of metal rolling surface.

**Keywords:** fractal dimension, surface defect of metal rolling, multichannel structure.

---