

УДК 004.932.2

АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ ПО ИНФОРМАЦИОННО-КОРРЕЛЯЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Н. В. Рыбина, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-0377-5605, e-mail: pgnv@mail.ru

Н. Б. Рыбин, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры МНЭЛ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-2000-0158, e-mail: nikolay.rybin@yandex.ru

В. Д. Степнов, магистрант РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0007-1945-751X, e-mail: vad.stepnov@yandex.ru

Рассматриваются методы анализа дефектов на поверхности твердотельных материалов по их изображениям. Приводятся результаты обработки изображений с различными типами дефектов на поверхности с помощью флуктуационного анализа и метода средней взаимной информации.

Ключевые слова: поверхность, анализ изображений, метод флуктуационного анализа с исключенным трендом (2D DFA), средняя взаимная информация (СВИ), информационно-корреляционные характеристики.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-86-179-185

Введение

Состояние поверхности твердотельных материалов оказывает существенное влияние на функциональные свойства этих материалов. В полупроводниках, например, поверхностные дефекты могут служить центрами рекомбинации. В металлах дефекты проявляются в виде нарушения сплошности металла, например пористость, раковины, скопления пузырей, наличие неметаллических включений. Причиной их образования могут быть нарушения технологии выплавки и разливки стали, повышенная загрязненность металла, нарушения температурно-временных параметров, отклонения в температурно-деформационной обработке слитка. Дефекты на поверхности металла ухудшают их физические и механические свойства, такие как электропроводность, прочность и другие. Исследования дефектов на поверхности металлов ведутся на различных стадиях изготовления продукции, например на стадии горячекатаного проката [1], производства заготовок из стали [2], литейного производства [3].

Среди методов обнаружения дефектов металлов можно выделить дефектоскопию, включающую в себя капиллярный контроль, магнитный контроль, ультразвуковой контроль, вихре-токовый контроль. Это неразрушающие методы обнаружения дефектов, однако их основной недостаток – необходимость использования специального оборудования, а значит, сложность контроля дефектов непосредственно на производственной линии изготовления материалов.

С этой точки зрения наиболее приемлемый способ контроля дефектов – анализ изображений поверхности материалов. В качестве характеристик дефектности здесь можно использовать параметры шероховатости (например, R_a , R_z). Однако эти характеристики хорошо работают на более простых, гладких текстурах. Если же поверхность материала более сложная, например материал композиционный, гетерофазный, то для этих случаев целесообразно применять специальные методы анализа поверхности.

В ряде работ, например [4-6], рассмотрены методы анализа изображений поверхностей по их информационно-корреляционным характеристикам. Метод флуктуационного анализа с исключенным трендом (2D detrended fluctuation analysis, 2D DFA) позволяет выявлять периодичность в сложных поверхностях (с большим числом гармонических составляющих, зашумленных с нарушением периодичности); изучать особенности поверхности на разных пространственных масштабах. Метод 2D DFA заключается в следующем. Особенности релье-

ефа или структуры поверхности на изображениях, полученных с помощью методов микроскопии, отображаются в виде участков с различными уровнями яркости. Например, в методах сканирующей зондовой микроскопии уровни яркости соответствуют высотам; в растровой электронной микроскопии – интенсивности генерации вторичных электронов; в оптической микроскопии – наклону поверхности, коэффициенту отражения и др. По значениям этих уровней в каждой точке изображения вычисляется функция кумулятивных сумм. Полученная зависимость разбивается на фрагменты различного масштаба; на каждом фрагменте устраняется линейный тренд и рассчитывается флуктуационная функция. В результате получается зависимость флуктуационной функции от масштаба, из которой находятся следующие величины: корреляционный вектор (соответствует периоду гармонических составляющих поверхности), скейлинговый показатель (определяет тип корреляций).

Метод средней взаимной информации (СВИ), основанный на теории информации, позволяет определять несовершенства, искажения рельефа поверхности. Метод СВИ заключается в следующем. Взаимная информация определяется как количество информации о значении случайной функции в точке A , когда становится известным ее значение в точке B . Если D – область определения, Z – область случайной функции, P_A, P_B – плотности распределения вероятностей в точках A и B , P_{AB} – совместная плотность распределения в точках A и B , то взаимная информация $I_{AB}(z_1, z_2)$ для пары известного и предсказываемого значения рассчитывается по следующей формуле:

$$I_{AB}(z_1, z_2) = \log_2 \left[\frac{P_{AB}(z_1, z_2)}{P_A(z_1) \cdot P_B(z_2)} \right]. \quad (1)$$

Путем интегрирования значения взаимной информации по всем парам точек исходного изображения получают преобразованные функции СВИ (свертки). В результате получают распределение взаимной информации в фазовом пространстве, из которого определяются СВИ (характеризует степень упорядоченности), максимальная взаимная информация (характеризует информационную емкость поверхности).

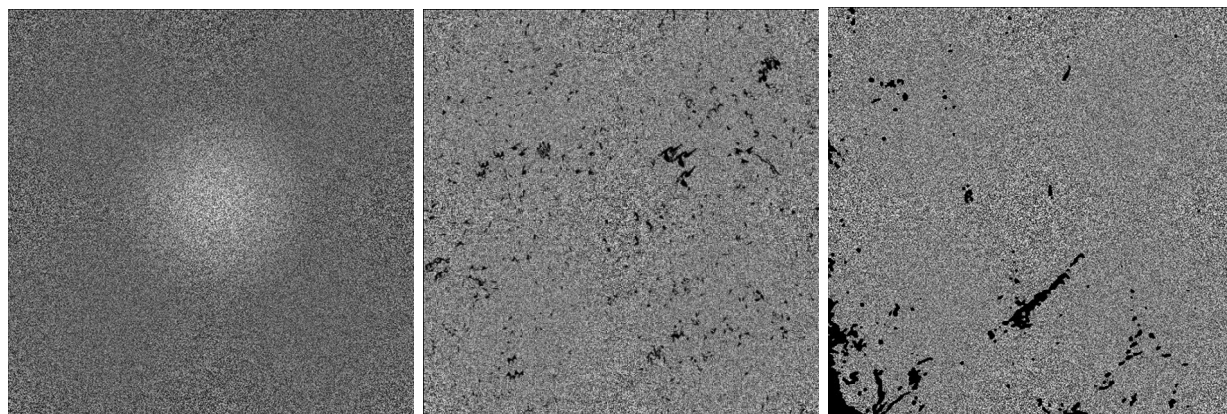
Цель работы – выявить критерии наличия дефектов на поверхности с помощью методов СВИ, 2D DFA и сопоставить информационно-корреляционные параметры с типом дефектов.

Объекты исследования

В данной работе в качестве исследуемых объектов взяты модельные поверхности с различными типами дефектов, а также реальные дефекты на поверхностях металлов.

Модельные поверхности создавались с помощью методов компьютерной графики на основе наиболее часто встречающихся типов дефектов на подложках и пленках после выполнения различных технологических процессов. Изображения поверхностей для исследований были получены путем наложения изображений дефектов на модельную поверхность «Равномерный шум». Равномерный шум выбран как модель подложки или гладкой поверхности твердотельного материала. Примеры изображений модельных поверхностей показаны на рисунке 1.

Кроме модельных поверхностей были исследованы изображения реальных металлов с распространенными дефектами, которые оказывают влияние на их структуру и свойства. В работе [7] был составлен атлас дефектов, обнаруженных металлографическими методами [8]. На рисунке 2 показаны изображения [7] поверхности металлов (увеличение 10 раз), которые представляют следующие типы дефектов. Флокены – это трещины в структуре металла, образующиеся из-за водородного охрупчивания металла. Размер и поверхность флоконов зависит от марок стали, их газонасыщенности и загрязненности. Морщины – дефект поверхности металла в виде группы чередующихся продольных выступов и углублений, расположенных чаще всего по всей длине проката.



а (a)

б (b)

в (c)

Рисунок 1 – Примеры модельных поверхностей: а – «Бугор по центру»;

б – «Точечные дефекты»; в – «Грязь крупная»

Figure 1 – Examples of model surfaces: a – «Hillock in the center»; b – «Spot defects»; c – «Large dirt»

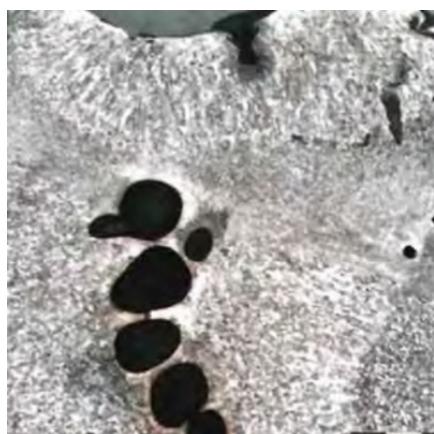
Поры – это полости, заполненные газом. Они могут располагаться поодиночке, группами или цепочкой. Чешуйчатость – дефект, представляющий собой разветвление мелких отслоений и надрывов металла, расположенных сотообразно на поверхности металла.



а (a)



б (b)



в (c)



г (d)

Рисунок 2 – Примеры дефектов на поверхности металлов [7]: а – «Макрошлиф с флокенами»;

б – «Металл с морщиной»; в – «Скопление сферических пор на поверхности металла»;

г – «Чешуйчатость на поверхности металла»

Figure 2 – Examples of defects on metal surface [7]: a – «Macrosection with flakes»;

b – «Metal with a wrinkle»; c – «Accumulation of spherical pores on metal surface»;

d – «Scaliness on metal surface»

Математическая обработка изображений проводилась методами 2D DFA и СВИ. Были получены графики и информационно-корреляционные характеристики, которые сравнивались с данными поверхности «Равномерный шум».

Результаты исследования и их анализ

На рисунке 3 показаны зависимости флуктуационной функции от масштаба в двойном логарифмическом представлении, полученные с помощью метода 2D DFA, для поверхностей «Равномерный шум» и «Бугор по центру». Вид зависимости для поверхности «Бугор по центру» нелинейный и существенно отличается от зависимости поверхности «Равномерный шум». Кроме этого, отличаются скейлинговые показатели a , которые рассчитывались как тангенс угла наклона флуктуационной функции [4]. Скейлинговый показатель характеризует тип корреляций в структуре. В таблице приведены рассчитанные значения a , СВИ и МВИ для всех исследованных модельных и реальных поверхностей.

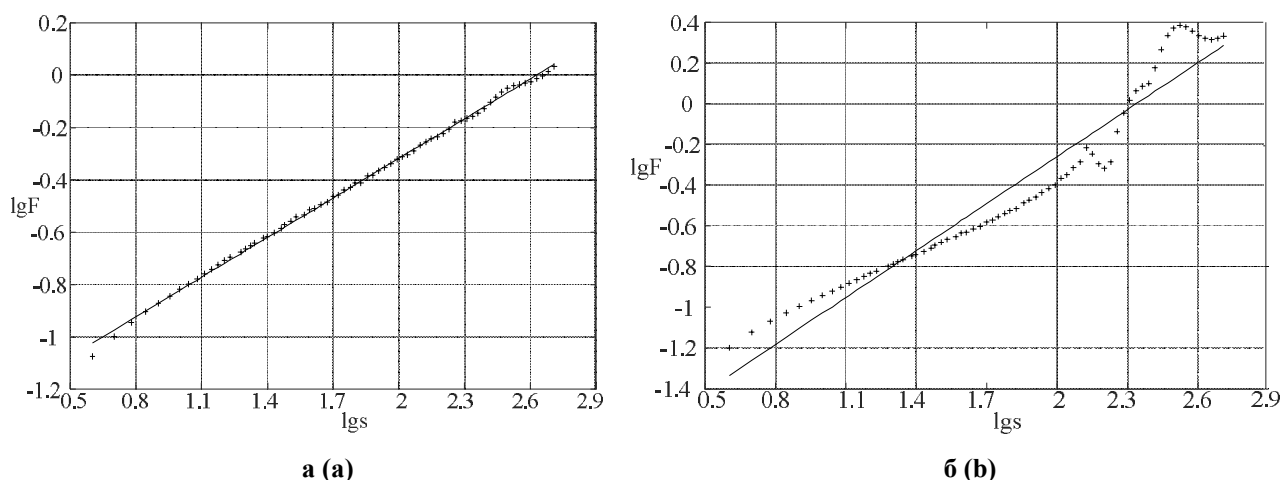


Рисунок 3 – Графики 2D DFA для поверхностей: а – «Равномерный шум»;

б – «Бугор по центру»

Figure 3 – 2D DFA graphs for surfaces: a – «Uniform noise»; b – «Hillock in the center»

Информационно-корреляционные характеристики модельных поверхностей с дефектами Information and correlation characteristics of model surfaces with defects

Название поверхности	СВИ	МВИ	a
Равномерный шум	0,0012	0,689	0,50
Бугор по центру	0,0003	0,623	0,60
Грязь крупная	0,0002	0,707	0,65
Скол	0,0002	0,698	0,65
Точечные дефекты мелкие	0,0003	0,694	0,50
Точечные дефекты крупные	0,0002	0,701	0,63
Углубление по центру	0,0003	0,621	0,57
Царапины крупные	0,0003	0,694	0,71
Царапины мелкие	0,0003	0,700	0,65
Макрошлиф с флокенами	0,0077	0,582	1,14
Металл с морщиной	0,0091	0,710	0,71
Скопление сферических пор на поверхности металла	0,0148	0,666	1,19
Чешуйчатость на поверхности металла	0,0086	0,632	0,83

Анализ полученных данных показывает, что СВИ всех поверхностей меньше 0,02, что говорит о низкой упорядоченности структур [4]. При этом СВИ для поверхности «Равномер-

ный шум» составляет 0,0012, а для остальных модельных поверхностей с дефектами СВИ существенно ниже (0,0002 – 0,0003).

Значения СВИ для реальных поверхностей получились гораздо выше по сравнению с модельными. Это связано с наличием более развитого рельефа поверхности, а также с тем, что присутствуют дефекты не одиночные, а целой группой.

Таким образом, СВИ является критерием наличия дефектов на поверхности. Можно заключить, что значение СВИ, отличающееся, по крайней мере, в два раза в меньшую или большую сторону, говорит о присутствии каких-либо дефектов на поверхности.

В [1] также обозначены диапазоны значений МВИ:

- МВИ < 0,5 – низкая информационная емкость и энтропия структур;
- $0,5 < \text{МВИ} < 0,7$ – средняя информационная емкость и энтропия структур;
- МВИ > 0,7 – высокая информационная емкость и энтропия структур.

По этим критериям большинство исследованных поверхностей относится к группе структур со средней информационной емкостью и энтропией. Поверхности «Грязь крупная», «Точечные дефекты крупные», «Царапины мелкие», «Металл с морщиной» относятся к категории структур с высокой информационной емкостью и энтропией.

Таким образом, в значениях МВИ не прослеживается однозначной взаимосвязи с наличием дефектов на поверхности.

Значения скейлингового показателя для исследованных модельных поверхностей составляют диапазон 0,5 – 0,7, среди реальных поверхностей присутствуют значения выше (до 1,19). Все величины попадают в категорию длительных и нестепенных корреляций в структуре. При этом наблюдается взаимосвязь значений скейлингового показателя и типа дефектов на поверхности. Для поверхности «Точечные дефекты мелкие» значение a такое же, как и для поверхности «Равномерный шум». Вероятно, это связано с мелким масштабом проявления особенностей поверхности и на величине скейлингового показателя они не отражаются. Однако, как только дефекты на поверхности становятся более крупными, значение скейлингового показателя повышается. Кроме того, дефекты одного масштаба дают примерно одинаковые значения a (например, у поверхностей «Бугор по центру» и «Углубление по центру» $a = 0,60$ и $0,57$ соответственно; у поверхностей «Грязь крупная», «Скол» и «Царапины мелкие» $a = 0,65$). Из модельных поверхностей самое больше значение скейлингового показателя у поверхности «Царапины крупные» и составляет 0,71. Для реальных поверхностей значения скейлингового показателя еще выше (от 0,71 до 1,19). Вероятно, это связано с повышением развитости рельефа поверхности и, следовательно, упорядоченности в структуре по сравнению с поверхностями, в основе которых присутствует шумовая составляющая.

Заключение

Таким образом, результаты обработки изображений с различными типами дефектов на поверхности с помощью методов 2D DFA и СВИ показывают, что данные методы могут служить эффективным инструментом обнаружения несовершенств рельефа поверхности. Выявление дефектов поверхности может происходить на основе сравнения данных с характеристиками эталонного рельефа поверхности. Наиболее эффективными информационно-корреляционными характеристиками в этом вопросе являются СВИ и a . При этом, если СВИ характеризует только наличие дефектов на поверхности, то по величине скейлингового показателя возможно также определить тип дефекта.

Методы анализа изображений 2D DFA и СВИ имеют практическое значение для большого класса задач. В области металлообработки требуется своевременное выявление дефектов, поскольку они оказывают колоссальное влияние на функционирование различных соединительных деталей, элементов и узлов.

Таким образом, методы СВИ и 2D DFA позволили выявить большинство дефектов. Кроме этого, если с помощью значения скейлингового показателя не удалось точно определить наличие дефекта, то это можно сделать по виду зависимости флуктуационной функции. По-

этому целесообразно для обнаружения дефектов поверхности применять комплекс методов СВИ и 2D DFA.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003) на оборудовании Регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп) Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина.

Библиографический список

1. Ковалева И.А., Потапенко Ю.А. Исследования дефектов горячекатаного проката сортопрокатного цеха № 1 стана 850, имеющих прокатную природу образования, на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» // Литье и металлургия. 2019. № 2. С. 60-66.
2. Рябошук С.В., Ковалев П.В. Анализ причин образования дефектов заготовок из стали 12X18H10T и разработка рекомендаций по их устранению // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2023. Т. 25. № 1. С. 6-15.
3. Кузовов С.С., Макаренко К.В., Жижкина Н.А. Методика исследования дефектов типа «горячая трещина» // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 11. С. 799-805.
4. Рыбина Н.В., Вихров С.П., Рыбин Н.Б. Классификация степени самоорганизации рельефа тонкопленочных структур с помощью методов 2D DFA и СВИ // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2017. № 61. С. 143-151.
5. Рыбина Н.В., Алпатов А.В., Рыбин Н.Б. Критерии определения структурной сложности поверхности // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 73. С. 139-146.
6. Рыбина Н.В., Рыбин Н.Б., Трегулов В.В., Скопцова Г.Н. Исследование влияния режимов термической обработки на информационно-корреляционные свойства поверхности пленки пористого кремния // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 84. С. 207-214.
7. Васин О.Е. Атлас дефектов. Научно-технический сборник / О.Е. Васин, В.М. Югай, Р.А. Садурдинов, В.А. Подмогаев, В.Б. Гейцан, Н.К. Кареев, А.А. Селиванов. Екатеринбург, 2008. 56 с.
8. Прудова О.Г., Жаворонков А.Ф. Металлографические методы контроля качества металла: учеб. пособие для вузов / ГМА им. Макарова. СПб., 2009. 32 с.

UDC 004.932.2

SURFACE DEFECTS ANALYSIS BY INFORMATION-CORRELATION CHARACTERISTICS

N. V. Rybina, PhD. (in physics and mathematics), associate professor, department of Micro- and Nanoelectronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-0377-5605, e-mail: pgnv@mail.ru

N. B. Rybin, PhD. (in physics and mathematics), associate professor, department of Micro- and Nanoelectronics, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0003-2000-0158, e-mail: nikolay.rybin@yandex.ru

V. D. Stepnov, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0007-1945-751X, e-mail: vad.stepnov@yandex.ru

The methods of analyzing defects on the surface of solid-state materials from their images are considered. The results of processing images with various types of defects on the surface using fluctuation analysis and the method of average mutual information are presented.

Keywords: surface, image analysis, method of detrended fluctuation analysis (2D DFA), average mutual information (AMI), information and correlation characteristics.

DOI: 10.21667/1995-4565-2023-86-179-185

References

1. **Kovaleva I.A., Potapenko Yu.A.** Issledovaniya defektov goryachekatanogo prokata sortoprokatnogo cekha no. 1 stana 850, imeyushchih prokatnyu prirodu obrazovaniya, na OAO «BMZ – upravlyayushchaya kompaniya holdinga «BMK». *Lit'e i metallurgiya*. 2019, no. 2, pp. 60-66. (in Russian).
2. **Ryaboshuk S.V., Kovalev P.V.** Analiz prichin obrazovaniya defektov zagotovok iz stali 12X18H10T i razrabotka rekomendacij po ih ustraneniyu. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. 2023, vol. 25, no. 1, pp. 6-15. (in Russian).
3. **Kuzovov S.S., Makarenko K.V., Zhizhkina N.A.** Metodika issledovaniya defektov tipa «goryachaya treshchina». *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya metallurgiya*. 2016, vol. 59, no. 11, pp. 799-805. (in Russian).
4. **Rybina N.V., Vihrov S.P., Rybin N.B.** Klassifikatsiya stepeni samoorganizatsii rel'efa tonkoplenochnykh struktur s pomoshh'ju metodov 2D DFA i SVI. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radio-technicheskogo universiteta*. 2017, no. 61, pp. 143-151. (in Russian).
5. **Rybina N.V., Alpatov A.V., Rybin N.B.** Kriterii opredeleniya strukturnoj slozhnosti poverhnosti. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2020, no. 73, pp. 139-146. (in Russian).
6. **Rybina N.V., Rybin N.B., Tregulov V.V., Skopcova G.N.** Issledovanie vliyanija rezhimov termicheskoy obrabotki na informacionno-korreljacionnye svoystva poverhnosti plenki poristogo kremnija. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2023, no. 84, pp. 207-214. (in Russian).
7. **Vasin, O.E.** Atlas defektov. *Nauchno-tehnicheskij sbornik* / O.E. Vasin, V.M. Jugaj, R.A. Sadrtidinov, V.A. Podmogaev, V.B. Gejcan, N.K. Kareev, A.A. Selivanov. Ekaterinburg, 2008. 56 p. (in Russian).
8. **Prudova O.G., Zhavoronkov A.F.** Metallograficheskie metody kontrolya kachestva metalla: ucheb. posobie dlya vuzov / GMA im. Makarova. SPb., 2009. 32 p. (in Russian).