

## МЕТОДИКА АНАЛИЗА ОБЪЕМНЫХ ДЕФЕКТОВ ПО ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

© 2021 г. А.А. Дедкова<sup>1,\*</sup>, И.В. Флоринский<sup>2,\*\*</sup>, Е.Э. Гусев<sup>1</sup>, Н.А. Дюжев<sup>1</sup>, М.Ю. Фомичев<sup>1</sup>, М.Ю. Штерн<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия  
124498 Москва, Зеленоград, пл. Шокина, 1

<sup>2</sup>Институт математических проблем биологии РАН — филиал ФИЦ «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН»,  
Россия 142290 Московская обл., г. Пуцино, ул. проф. Виткевича, 1  
E-mail: \*dedkova@ckp-miet.ru; \*\*iflor@mail.ru

Поступила в редакцию 11.07.2021; после доработки 10.09.2021  
Принята к публикации 11.10.2021

Разработана методика выявления и анализа объемных поверхностных дефектов, в основе которой лежит геоморфометрическое моделирование, в частности — анализ моделей и карт ряда морфометрических величин (минимальная кривизна, максимальная кривизна, средняя кривизна, гауссова кривизна, несферичность и др.), рассчитываемых по цифровым моделям рельефа поверхности. Методика позволяет выявлять области расположения отдельных объемных дефектов (трещин, отслоений пленок, отклонений формы и др.), определять форму и размеры как самих дефектов, так и видоизмененных областей рядом с ними, исследовать паттерны их распределения. Работоспособность методики продемонстрирована на примере дефектов на сборках пластин кремний—стекло и кремний—кремний, на растрескавшейся пленке Ni—W. Методика может быть перспективной для контроля качества изготовления и диагностики поврежденных различных деталей, в частности изделий микроэлектроники.

*Ключевые слова:* поверхность, рельеф, топография, кривизна, деформация, кремниевая пластина, оптическая профилометрия, дефект, геоморфометрия, цифровая модель рельефа, ЦМР, трещина, растрескивание, шероховатость.

**DOI:** 10.31857/S0130308221110051

### ВВЕДЕНИЕ

Обнаружение и анализ дефектов различных объектов является распространенной задачей во многих отраслях: в металлургии [1—3], микроэлектронике [4—8], строительстве и архитектуре [9], атомной энергетике [10, 11], сельском хозяйстве [12] и др.

Своевременное выявление и определение характеристик дефектов необходимо для межоперационного контроля в процессе изготовления структур, для контроля работоспособности готовых изделий в процессе их эксплуатации, для проведения подробного анализа напряженно-деформированного состояния близи сформированного дефекта. Детальная информация как о самом дефекте, так и об областях рядом с ним может быть востребована различными специалистами.

Для исследования и контроля дефектов широко используются оптические методы [3, 6, 10, 13—19]. В результате применения таких методов может быть сформирована цифровая модель рельефа (ЦМР) поверхности исследуемого объекта. Как правило, приборы для формирования ЦМР снабжены программным обеспечением, позволяющим визуализировать распределение  $z(x, y)$ . Однако подробный анализ дефектов непосредственно по ЦМР часто затруднен в связи со сложной формой исследуемых объектов [19—23].

В статье рассмотрена методика, в которой для измерения и контроля используются не собственно ЦМР (матрица значений  $z(x, y)$ ), а геоморфометрическое моделирование, в частности — цифровые модели морфометрических величин, рассчитываемых по ЦМР как функции первых и

вторых частных производных  $p = \frac{\partial z}{\partial x}$ ,  $q = \frac{\partial z}{\partial y}$ ,  $r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$ ,  $t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$ ,  $s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$ . Геоморфометрия — научная дисциплина, предметом которой является математическое моделирование и анализ рельефа, а также взаимосвязей между ним и другими компонентами геосистем [24, 25].

Список наиболее часто используемых морфометрических величин: крутизна склона ( $G$ ), экспозиция склона ( $A$ ), горизонтальная кривизна ( $k_h$ ), вертикальная кривизна ( $k_v$ ), разностная кривизна ( $E$ ), избыточная горизонтальная кривизна ( $k_{he}$ ), избыточная вертикальная кривизна ( $k_{ve}$ ), аккумуляционная кривизна ( $K_a$ ), кольцевая кривизна ( $K_r$ ), минимальная кривизна ( $k_{\min}$ ), максимальная кривизна ( $k_{\max}$ ), средняя кривизна ( $H$ ), гауссова кривизна ( $K$ ), несферичность ( $M$ ) и др. Каждая из морфометрических

величин имеет свой физико-математический смысл. Их определения, формулы и интерпретации описаны в [25, 26]. Морфометрические величины рассчитываются в каждой точке поверхности (кроме особых точек) и, таким образом, характеризуют особенности геометрии окрестности каждой точки поверхности.

Целью статьи является ознакомление читателей с возможностями геоморфометрии для анализа и визуализации особенностей рельефа поверхности вблизи дефектов.

## ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Объектами исследования были два типа структур.

Первый: сборки двух пластин, соединенных при помощи адгезивного слоя (специального клея) на установке временного бондинга [29]. Дефекты были вызваны паразитными затеканиями жидкостей, повреждениями тонкой пленки слоя Si (ее отслоением), неравномерным совмещением пластин и их изгибом. Исследовали:

- сборку из стекла толщиной 500 мкм и кремния толщиной 140 мкм, оба — диаметром 150 мм;
- сборку из двух кремниевых пластин различного диаметра: 100 мм и 150 мм.

Стоит отметить, что отслаивание пленок, проявляющееся в виде одиночных трещин или вспучивания, является типичным дефектом для систем пленка—подложка [7, 30—36].

Второй тип исследуемых структур: пленка Ni—W на подложке теллурида висмута. Анализировали область растрескивания пленки. Пленка Ni—W была сформирована методом гальванического осаждения из щелочного электролита на базе  $\text{NiSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ , NaOH,  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \times 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4\text{OH}$  25%,  $\text{H}_2\text{WO}_4$ , при температуре 50 °С и плотности тока 10 А/дм<sup>2</sup>.

Исследуемые структуры являлись специально подобранными бракованными изделиями.

Для построения ЦМР поверхности использовался оптический профилометр Veeco Wyko NT 9300, реализующий метод вертикальной сканирующей интерферометрии [19, 20, 27, 28].

Были получены и проанализированы шесть ЦМР: области с крестообразным дефектом на сборке кремний—стекло размером 9,5×10,4 мм (разрешение ЦМР 0,0287 мм) и размером 3,3×123,1 мм (разрешение ЦМР 0,1148 мм) — рис. 1; верхней и нижней пластин сборки кремний—кремний различного диаметра (разрешение ЦМР 0,1148 мм) — рис. 2; области с протяженными дефектами на сборке кремний—стекло размером 3,4×4,6 мм (разрешение ЦМР 0,0072 мм) — рис. 3; области растрескавшейся пленки Ni—W размером 3,4×4,6 мм (разрешение ЦМР 0,0072 мм) — рис. 4.

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА

Для геоморфометрического моделирования (анализа ЦМР) поверхности исследуемых образцов был применен универсальный спектрально-аналитический метод моделирования рельефа на основе ортогональных разложений высокого порядка с использованием полиномов Чебышева I рода с последующим суммированием Фейера [37]. Метод предназначен для обработки регулярных ЦМР в рамках единой схемы, включающей глобальную аппроксимацию ЦМР, генерализацию, сглаживание и подавление шума в ЦМР, а также расчет морфометрических величин на основе аналитического вычисления частных производных различного порядка. Аппроксимация характеризуется монотонной сходимостью и возможностью быстрого глубокого разложения функции высоты. Также в ряде случаев использовался расчет кривизн напрямую через первые и вторые частные производные [38] после сглаживания ЦМР с помощью универсального спектрально-аналитического метода [37].

В результате геоморфометрического моделирования были получены цифровые модели и карты  $k_{\min}$ ,  $k_{\max}$ ,  $H$ ,  $K$ ,  $M$  поверхности исследуемых образцов (рис. 1б, в, е—з; рис. 2; рис. 3в, г; рис. 4б—д).

При анализе рассчитанных моделей морфометрических величин учитывались известные из дифференциальной геометрии и геоморфометрии закономерности [25, 26]:

- знак гауссовой кривизны  $K$  позволяет анализировать локальную форму поверхности: выделять эллиптические ( $K > 0$ ), седловые ( $K < 0$ ) и параболические точки ( $K = 0$ );

- знаки главных кривизн  $k_{\min}$  и  $k_{\max}$  позволяют выделять локальные выпуклые и вогнутые элементы рельефа:  $k_{\max} > 0$  соответствуют протяженным выпуклым областями поверхности,  $k_{\max} < 0$  — локальным вогнутым элементам рельефа («впадинам»),  $k_{\min} > 0$  соответствуют локальным выпуклым участкам («бугоркам»),  $k_{\min} < 0$  — протяженным вогнутым участкам поверхности;

- по знаку средней кривизны поверхности  $H$  можно анализировать локальную форму поверхности. Для выпуклых локальных участков поверхности —  $H > 0$ , для вогнутых —  $H < 0$ , для локальных участков уплощения —  $H = 0$ ;
- несферичность  $M$  показывает, насколько форма элемента поверхности отклоняется от сферической (для сферы  $M = 0$ ).

Расположение и размеры паттернов рельефа, отображаемых на картах кривизн? — существенно различается в зависимости от используемой глубины разложения исходной ЦМР (т.е. от количества коэффициентов разложения ( $n$ ), используемого при восстановлении аппроксимированной ЦМР). Чем меньше значение  $n$ , тем сильнее степень генерализации (сглаживания) ЦМР. Карты морфометрических величин, рассчитанные при существенно отличающихся (например, на порядок) значений  $n$ , позволяют выявлять паттерны рельефа, которые относятся к разным уровням пространственной иерархии (масштаба).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены карты рельефа и рассчитанных моделей морфометрических величин для поверхности сборки кремний—стекло вблизи расположения крестообразного дефекта. Для оценки

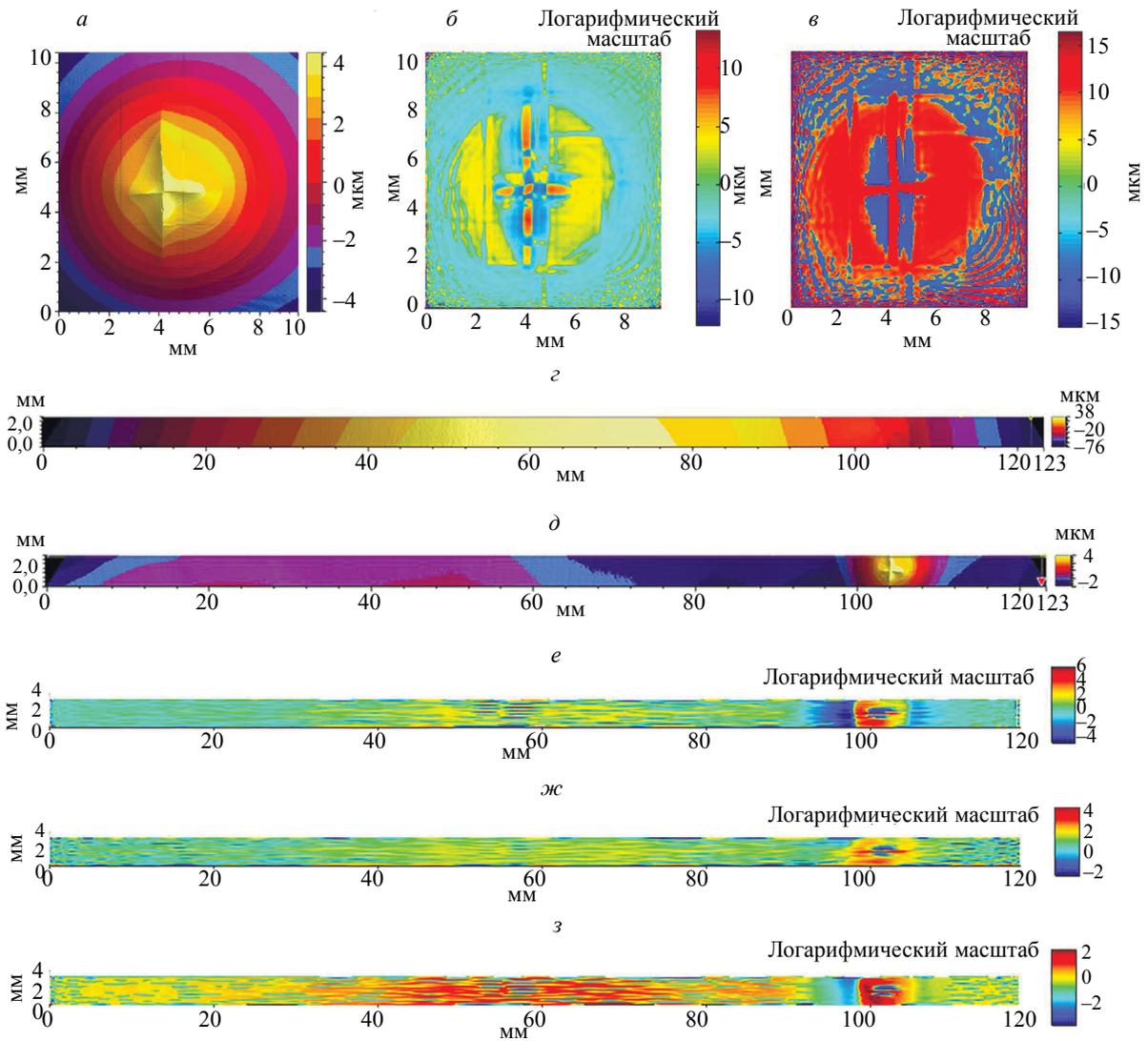


Рис. 1. Исходный ( $a, z$ ) и модифицированный ( $d$ ) рельефы поверхности области с дефектом сборки кремний—стекло; рассчитанные по ЦМР морфометрические величины: гауссова кривизна  $K$  ( $b, e$ ), средняя кривизна  $H$  ( $в, ж$ ), минимальная кривизна  $k_{\min}$  ( $з$ ). Размер области анализа порядка  $10 \times 10$  мм ( $a—в$ ),  $4 \times 120$  мм ( $z—з$ ).

области размером  $3,3 \times 123,1$  мм также приведена карта рельефа этого образца после удаления трендовой составляющей формы (рис. 1д) — сферы. Преимущественно, область самого дефекта («трещин») во всех случаях отображается красным цветом (см. рис. 1б, в, е—з — высокие положительные значения), что соответствует локальной выпуклой форме поверхности. При этом присутствуют области с  $K < 0$  (см. рис. 1б), что означает наличие локальных седловых участков. Непосредственно примыкающие к трещине области на расстоянии от центра дефекта до 1,7 мм отображены синим цветом (см. рис. 1б, в, е—з — большие отрицательные значения), что соответствует вогнутой седловой форме поверхности. Дальше от центра трещины располагаются области положительной кривизны (см. рис. 1б, в, е—з) протяженностью порядка 1,4 мм, соответствующие выпуклой форме поверхности. А еще дальше от дефекта — наблюдаются области  $K < 0$ , протяженностью порядка 6,5 мм. Анализ позволил выявить, что размер затронутой деформацией области существенно превышает видимый невооруженным глазом размер дефекта, определить ее качественные особенности. Вдоль меньшей стороны дефекта визуальна длина составила порядка 2 мм, реальная общая протяженность деформированной области (вспучивание пленки) — порядка 18—20 мм (что хорошо видно и на рис. 1д, и на рис. 1е—з). Анализ, проведенный с использованием геоморфометрического моделирования (см. рис. 1б, в, е—з), позволяет получать гораздо более подробную информацию о пространственных характеристиках дефекта, чем непосредственно по ЦМР (см. рис. 1а, з, д).

Использование методов геоморфометрии для анализа дефектов по площади поверхности сборки кремний—кремний показано на рис. 2. С помощью карт главных кривизн проанализирован характер расположения дефектов соединения на верхней пластине и особенности изменения формы нижней пластины. В частности, поверхность верхней пластины содержит множество локальных вогнутых областей (отрицательные  $k_{\max}$ , рис. 2а) и протяженную разветвленную вогнутую область (отрицательные  $k_{\min}$ , рис. 2б). При проведении генерализации ЦМР с большим коэффициентом разложения  $n$  определено расположение локальных вогнутых областей меньшего размера. На картах главных кривизн нижней пластины видна слегка вогнутая область в ее центре (левее базового среза верхней пластины).

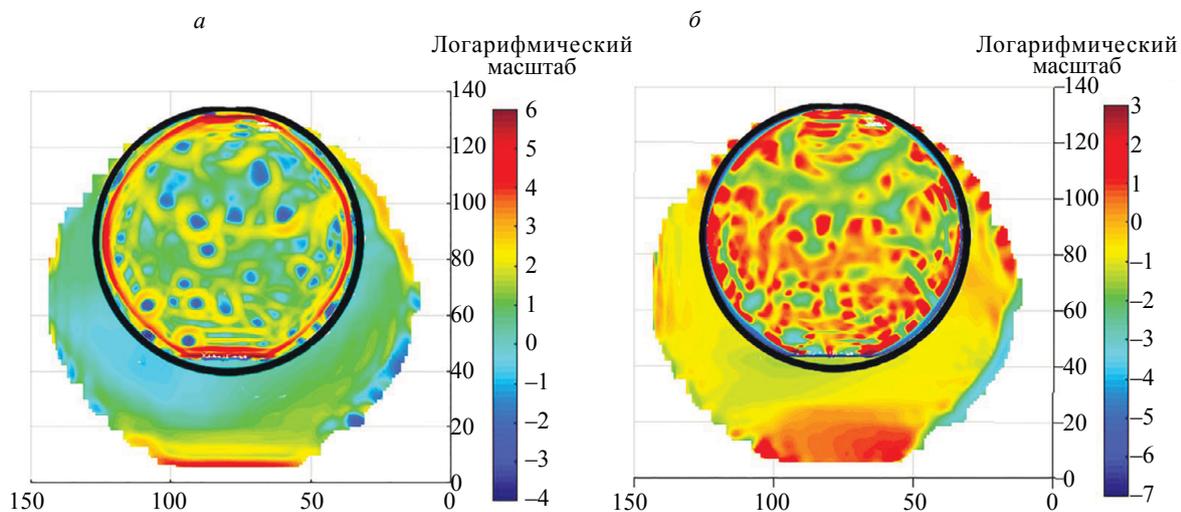


Рис. 2. Рассчитанные по ЦМР морфометрические величины для двух соединенных кремниевых пластин диаметром 100 мм (сверху) и 150 мм (снизу): максимальная кривизна  $k_{\max}$  (а), минимальная кривизна  $k_{\min}$  (б). Черной окружностью показана граница соединения двух ЦМР, проходящая по периметру верхней пластины диаметром 100 мм.

Анализ карт морфометрических величин показал, что потенциально полезная возможность применения методов геоморфометрии — это выявление расположения протяженных дефектов, которые слабо различимы на исходной карте рельефа поверхности, построенной непосредственно по ЦМР. Хотя при достаточно большом опыте проведения исследований и возможности использовать 3D-отображение эти протяженные дефекты могут быть обнаружены (рис. 3а), это требует мастерства оператора. Вместе с тем на картах морфометрических величин хорошо видны расположение и направление протяженных областей (как выпуклой, так и вогнутой формы). Авторы пола-

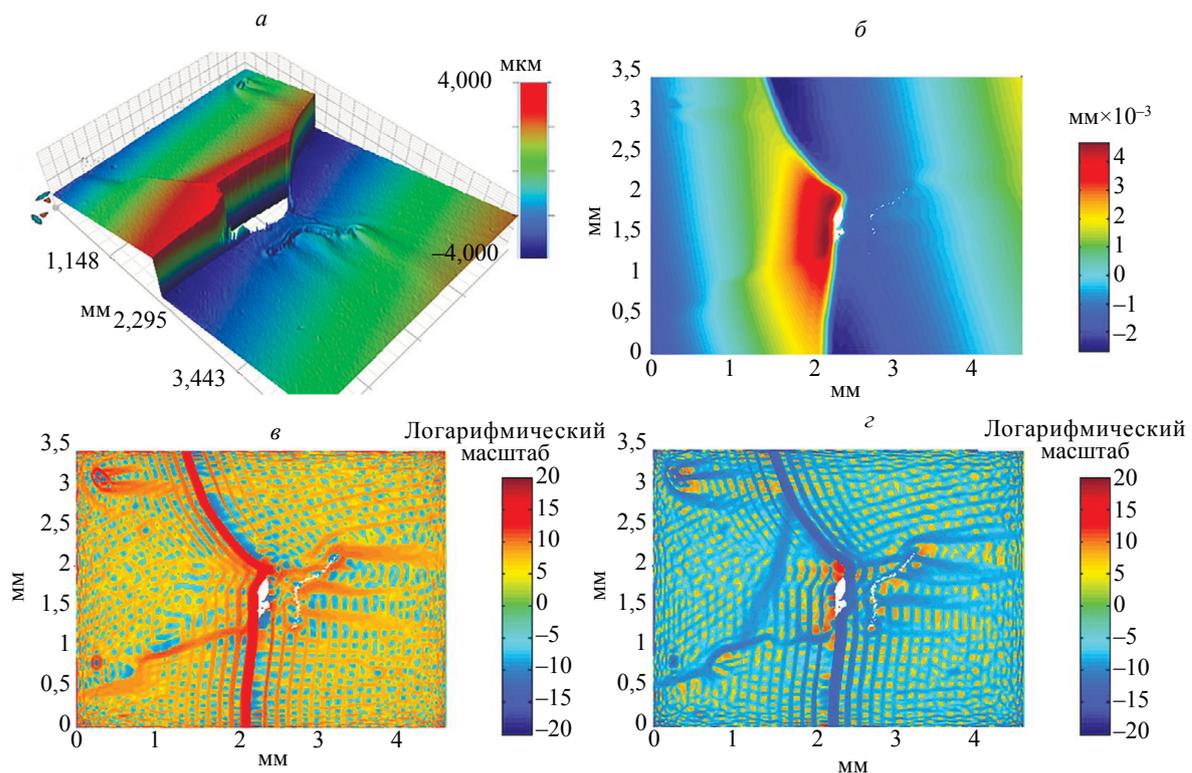


Рис. 3. Рельеф поверхности области с трещинами сборки кремний—стекло в 3D (а) и 2D (б); рассчитанные по ЦМР морфометрические величины: максимальная кривизна  $k_{\max}$  (в), минимальная кривизна  $k_{\min}$  (г).

гают, что использование методов геоморфометрии позволит не только более подробно анализировать такого типа дефекты, но и выявлять их на порядок раньше, чем это можно было бы сделать, используя только ЦМР.

Использование геоморфометрического моделирования для выявления протяженных дефектов, слабо различимых на ЦМР поверхности, показано на рис. 3 для сборки кремний—стекло. На рис. 3в по наибольшему значению  $k_{\max}$  видны протяженные выпуклые области, а на рис. 3г по наименьшему  $k_{\min}$  — протяженные вогнутые, в комплексе составляющие протяженный дефект.

Анализ отслоившейся и растрескавшейся пленки Ni—W показан на рис. 4. Ближе к левой верхней части изображений хорошо видны границы отдельные областей растрескивания (рис. 4б—г). Такой подход к анализу и визуализации дефектов удобен для определения размеров отдельных квазиполигональных структур или направления их ребер, что может быть важно для отдельных приложений [39].

Описанные методы могут быть полезны при анализе изменения исследуемого объекта с течением времени, в зависимости от приложенных воздействий, например, мембран [16, 38, 40, 41]. Геоморфометрическое моделирование может использоваться для исследования паттернов распределения дефектов и последующего построения физических моделей деградации объектов. Примененный нами математический аппарат, по всей видимости, может быть применен для анализа цифровых моделей данных, полученных на основе других физических принципов [42—45].

## ВЫВОДЫ

В статье показаны:

- возможность исследования размеров, расположения и характерных особенностей отдельных дефектов (неоднородностей рельефа) по ЦМР с использованием методов геоморфометрии (в том числе на объектах сложной формы) по картам гауссовой, средней, максимальной и минимальной кривизны и других морфометрических величин;

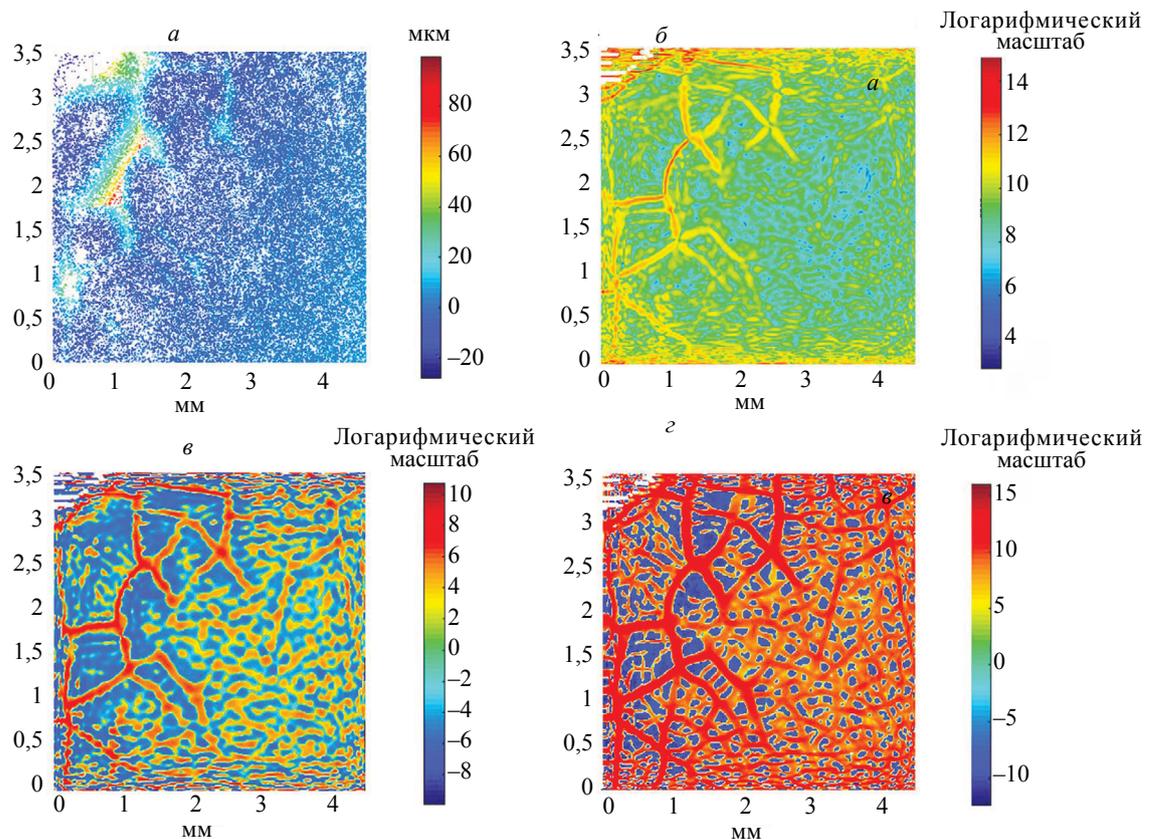


Рис. 4. Рельеф поверхности области растрескивания пленки Ni—W (а); рассчитанные по ЦМР морфометрические величины: несферичность  $M$  (б), средняя кривизна  $H$  (в), максимальная кривизна  $k_{\max}$  (г).

▪ возможность использования методов геоморфометрии для анализа расположения протяженных дефектов (в том числе для раннего их выявления), мелких выпуклых и вогнутых областей поверхности, областей растрескивания и др.;

▪ повышение наглядности и информативности представляемых данных при использовании методов геоморфометрии.

Авторы полагают, что описанная методика может быть полезна для более точного межоперационного контроля в процессе изготовления различных изделий, для визуализации дефектов на ранних стадиях их развития, а также для их подробного анализа.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «МСТ и ЭКБ» НИУ МИЭТ в рамках реализации программы ЛИЦ «Доверенные сенсорные системы» (Договор № 009/20 от 10.04.2020).

Работа соавторов А.А. Дедковой, Е.Э. Гусева и Н.А. Дюжева была проведена при финансовой поддержке Минкомсвязи России и АО «РВК» (Идентификатор соглашения о предоставлении субсидии — 0000000007119P190002).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев О.А., Шлеенков С.А., Гусев О.А., Шлеенков А.С. Выявление поверхностных микротрещин в металлических изделиях с помощью возбуждения высокочастотными вихревыми токами и визуализацией инфракрасной камерой // Дефектоскопия. 2016. № 8. С. 47—54.
2. Сташков А.Н., Сомова В.М., Корх Ю.В., Огнева М.С., Сташкова Л.А., Сажина Е.Ю. Магнитная и акустическая методики определения изменения фазового состава и динамики разрушения пластически деформированной бескобальтовой мартенситно-старееющей стали // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 54—68.
3. Оборин В.А., Банников М.В., Баяндин Ю.В., Соковиков М.А., Билалов Д.А., Наймарк О.Б. Фрактальный анализ поверхности разрушения сплава АМг6 при усталостном и динамическом нагружении // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 2. С. 116—126. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.2.07

4. Золотов Д.А., Бузмаков А.В., Елфимов Д.А., Асадчиков В.Е., Чуховский Ф.Н. Возможность выявления пространственного расположения одиночных дислокаций методом топо-томографии на лабораторных установках // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 1. С. 12—16. DOI: 10.7868/S0023476117010271
5. Клуникова Ю.В., Гусев Е.Ю. Исследование термоупругих напряжений в пленках поликристаллического кремния на подложке сапфира, полученных плазмохимическим осаждением // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 2 (196). С. 16—25. DOI: 10.23683/2311-3103-2018-2-16-25
6. Сенько С.Ф., Зеленин В.А. Оценка размеров топографических дефектов полупроводниковых кремниевых структур // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9. № 1. С. 74—84. DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84
7. Телятник Р.С., Осипов А.В., Кукушкин С.А. Релаксация деформаций несоответствия за счет пор и отслоений и условия образования дислокаций, трещин и гофров в эпитаксиальной гетероструктуре AlN(0001)/SiC/Si(111) // Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 1. С. 153—162.
8. Шугуров А.Р., Панин А.В. Механизмы периодической деформации системы «пленка-подложка» под действием сжимающих напряжений // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 3. С. 23—32.
9. Глушков С.П., Соловьев Л.Ю., Борисовская Н.Е. Выявление дефектов в усиленных композиционными материалами конструкциях методом инфракрасной термографии // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2015. № 4 (35). С. 36—42.
10. Будаев В.П., Мартыненко Ю.В., Химченко Л.Н., Житлухин А.М., Климов Н.С., Питтс Р.А., Линке И., Базылев Б., Белова Н.Е., Карпов А.В., Коваленко Д.В., Подковыров В.Л., Ярошевская А.Д. Рекристаллизация и изменение рельефа поверхности стали под воздействием излучения в плазменных разрядах большой мощности // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 11. С. 1017—1032. DOI: 10.7868/S0367292113110036
11. Финогенов Л.В., Завьялов П.С., Карлин В.Э., Хакимов Д.Р. Высокопроизводительный оптико-электронный контроль боковой поверхности топливных таблеток с определением глубины дефектов // Датчики и системы. 2016. № 7 (205). С. 53—59.
12. Будаговская О.Н., Будаговский А.В. Лазерная дефектоскопия плодов // Дефектоскопия. 2015. № 4. С. 63—73.
13. Карева Н.Т., Чунгаков Д.Т., Заварцев Н.А. Исследование трещинообразования при изготовлении выпускного клапана ДВС // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2019. Т. 19. № 2. С. 44—52. DOI: 10.14529/met190205
14. Алферова Е.А., Лычагин Д.В. Деформационный рельеф в кристаллах как способ релаксации напряжений // Письма о материалах. 2017. Т. 7. № 2 (26). С. 155—159. DOI: 10.22226/2410-3535-2017-2-155-159
15. ГОСТ Р 58399—2019.
16. Баженов С.Л., Разумовская И.В., Ковалец Н.П., Бедин С.А. Образование отслоений в металлическом покрытии трековой мембраны // Доклады Академии наук. 2019. Т. 488. № 1. С. 44—46. DOI: 10.31857/S0869-5652488144-46
17. Ol't Yu., Maksarov V.V., Makhov V.E. Intelligence systems for quality assessment of threaded surfaces and flaw monitoring based on digital light field recording // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 11. P. 915—926. DOI: 10.1134/S1061830920110054 [Ольт Ю., Максаров В.В., Махов В.Е. Интеллектуальные системы оценки качества обработки резьбовых поверхностей и контроля дефектов на основе цифровой регистрации светового поля // Дефектоскопия. 2020. № 11. С. 46—57. DOI: 10.31857/S0130308220110056].
18. Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Роголин В.Е., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А., Каплунов И.А., Иванова А.И. Модификация поверхности кремния при воздействии излучения наносекундного ультрафиолетового лазера // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2020. № 12. С. 628—636. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.628
19. Djuzhev N.A., Gusev E.E., Dedkova A.A., Makhboroda M.A. Non-destructive method of surface mapping to improve accuracy of mechanical stresses measurements // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 289, P. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012007
20. Ardigo M.R., Ahmed M., Besnard A. Stoney formula: Investigation of curvature measurements by optical profilometer // Advanced Materials Research. 2014. V. 996. P. 361—366. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.996.361
21. Kim J.H., Chung K. Thermo-mechanical constitutive equations for glass and its numerical formulation for warpage analysis of silicon-glassmultilayered structure // International Journal of Plasticity. 2015. V. 75. P. 204—225. DOI: 10.1016/j.ijplas.2014.12.006
22. Грибко В.В., Маркелов А.С., Трушин В.Н., Чупрунов Е.В. Управление кривизной поверхности дифракционных элементов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 5. С. 28—32. DOI: 10.7868/S0207352817050079
23. Якимчук И.В., Бузмаков А.В., Андреев А.В., Асадчиков В.Е. Исследование качества вогнутых сферических поверхностей скользящим пучком рентгеновского излучения // Кристаллография. 2012. Т. 57. № 2. С. 341—344.
24. Hengl T., Reuter H.I. (Eds.) Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Amsterdam: Elsevier, 2009. 796 p.

25. *Florinsky I.V.* Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology / 2nd ed. Amsterdam: Elsevier / Academic Press, 2016. 486 p.
26. *Florinsky I.V.* An illustrated introduction to general geomorphometry // *Progress in Physical Geography*. 2017. V. 41. No. 6. P. 723—752. DOI: 10.1177/0309133317733667
27. *Jiang C., Kilcullen P., Liu X., Ozaki T., Liang J.* Three-dimensional structured light profilometry using a bandwidth-limited projector // *Proceedings of SPIE*. 2019. V. 10932. P. 109320K. DOI: 10.1117/12.2510145
28. *Mao C.-L., Lu R.-S., Dong J.-T., Zhang Y.-Z.* Overview of the 3D profilometry of phase shifting fringe projection // *Jiliang Xuebao/Acta Metrologica Sinica*. 2018. V. 39 (5). P. 628—640. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2018.05.07
29. *Fomichev M.Y., Makhboroda M.A., Djuzhev N.A., Dedkova A.A., Gusev E.E.* Development of adhesive wafer bonding technology / *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021*. P. 2558—2562. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396080
30. *Ярцев В.И., Демьянов Б.Ф., Плотников В.А., Макаров С.В., Соломатин К.В.* Релаксационная структура и внутренние напряжения в тонких углеродных пленках // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2015. Т. 12. № 4. С. 477—481.
31. *Абрамян А.К., Бессонов Н.М., Индейцев Д.А., Мочалова Ю.А., Семенов Б.Н.* Влияние локализации колебаний на отслоение пленки от основания // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2011. № 1. С. 8—16.
32. *Кургузов В.Д.* Моделирование отслоения тонких пленок при сжатии // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2014. Т. 7. № 1. С. 91—99. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.10
33. *Кургузов В.Д., Демешкин А.Г.* Экспериментальное и теоретическое исследование потери устойчивости узких тонких пластин на упругом основании при сжатии // *Прикладная механика и техническая физика*. 2016. Т. 57. № 3 (337). С. 121—128. DOI: 10.15372/PMTF20160313
34. *Waters P.* Stress Analysis and Mechanical Characterization of Thin Films for Microelectronics and MEMS Applications / Ph.D. Thesis. Department of Mechanical Engineering College of Engineering University of South, Florida, 2008. 197 p.
35. *Evans A.G., Hutchinson J.W.* The thermomechanical integrity of thin films and multilayers // *Acta Metallurgica et Materialia*. 1995. V. 43. No. 7. P. 2507—2530. DOI: 10.1016/0956-7151(94)00444-M.
36. *Hutchinson J.W., Suo S.* Mixed mode cracking in layered materials // *Advances in applied mechanics*. 1992. V. 29. P. 63—191. DOI: 10.1016/S0065-2156(08)70164-9
37. *Florinsky I.V., Pankratov A.N.* A universal spectral analytical method for digital terrain modeling // *International Journal of Geographical Information Science*. 2016. V. 30. No. 12. P. 2506—2528. DOI: 10.1080/13658816.2016.1188932
38. *Machado G., Favier D., Chagnon G.* Membrane curvatures and stress-strain full fields of axisymmetric bulge tests from 3D-DIC measurements. Theory and validation on virtual and experimental results // *Experimental Mechanics*. 2012. V. 52. P. 865—880. DOI: 10.1007/s11340-011-9571-3
39. *Воронин А.С., Иванченко Ф.С., Хартов С.В.* Создание оптически прозрачного проводящего покрытия на основе самоорганизованного шаблона // *Решетневские чтения*. 2014. Т. 1. С. 459—461.
40. *Dedkova A.A., Dyuzhev N.A., Gusev E.E., Shtern M.Y.* Fast nondestructive technique for analyzing deflection of membranes located on the substrate // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2020. V. 56. No. 5. P. 452—459. DOI: 10.1134/S1061830920050046 [*Дедкова А.А., Дюжев Н.А., Гусев Е.Э., Штерн М.Ю.* Оперативная неразрушающая методика анализа прогиба мембран, расположенных на пластине // *Дефектоскопия*. 2020. № 5. С. 52—59. DOI: 10.31857/S0130308220050073].
41. *Дедкова А.А., Глаголев П.Ю., Гусев Е.Э., Дюжев Н.А., Киреев В.Ю., Лычев С.А., Товарнов Д.А.* Особенности деформирования круглых тонкопленочных мембран и экспериментальное определение их эффективных характеристик // *Журн. технической физики*. 2021. Т. 91. № 10. С. 1454—1465. DOI: 10.21883/JTF.2021.10.51357.121-21
42. *Головин Ю.И., Тюрин А.И., Головин Д.Ю., Самодуров А.А.* Электротоковая тепловая дефектоскопия металлических пластин // *Письма в Журн. технической физики*. 2017. Т. 43. № 19. С. 64—70. DOI: 10.21883/PJTF.2017.19.45083.16769
43. *Башевская О.С., Бушуев С.В., Подураев Ю.В., Мельниченко Е.А., Щербаков М.И., Гарсков Р.* Применение инфракрасной термографии для оценки линейных размеров подповерхностных дефектов // *Измерительная техника*. 2017. № 5. С. 34—37.
44. *Булъчев О.А., Шлеенков С.А., Лисиенко В.Е., Шлеенков А.С.* Исследование возможности обнаружения поверхностных дефектов в ферромагнитных изделиях пироэлектромангнитным методом // *Дефектоскопия*. 2010. № 4. С. 50—57.
45. *Ужегова Н.И., Свистков А.Л.* Многоуровневый анализ рельефа поверхности образца, полученного методами атомно-силовой микроскопии // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2016. Т. 9. № 3. С. 366—374. DOI: 10.7242/1999-6691/2016.9.3.30