

На правах рукописи



Напрюшкин Артем Алексеевич

**Математическое и программное обеспечение
системы оценки деформации по оптическим
изображениям для решения задач контроля
механического состояния материалов**

05.13.11 – Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных
сетей

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН и Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Плешанов Василий Сергеевич

Научный консультант:

кандидат технических наук, доцент
Замятин Александр Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Сущенко Сергей Петрович

кандидат технических наук, доцент
Мещеряков Роман Валерьевич

Ведущая организация:

**Учреждение Российской академии наук
Институт вычислительной математики и
математической геофизики Сибирского
отделения РАН, г. Новосибирск.**

Защита состоится «28» июня 2011 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.06 при ГОУ ВПО Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: г. Томск, ул. Советская, 84/3, Институт кибернетики ГОУ ВПО Национального исследовательского Томского политехнического университета.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ГОУ ВПО Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «27» мая 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д 212.269.06
кандидат технических наук, доцент

 М.А. Сонькин

Общая характеристика работы

В настоящее время одним из важнейших направлений обеспечения эффективной, надежной и безопасной эксплуатации конструкционных материалов является широкое применение методов неразрушающего контроля (МНК).

В промышленных масштабах разрушение конструктивных элементов может носить катастрофический характер и приводить к большим материальным потерям. Это обстоятельство обуславливает интенсификацию использования новых методов контроля для оценки состояния материалов металлоконструкций. Используя МНК, можно в процессе эксплуатации металлоконструкции обнаружить зоны локализации пластической деформации, что позволяет прогнозировать ресурс конструкции и наиболее вероятное место разрушения. В зависимости от принципа работы выделяют несколько десятков разнотипных МНК. Однако, большинство из них имеют те или иные ограничения для широкого использования по погрешности, разрешающей способности, сложности проведения измерений и др.

Одним из наиболее доступных и простых неразрушающих методов является оптический контроль, позволяющий выявлять поверхностные изменения материала в процессе производства и эксплуатации металлоизделий. Современный метод оптического контроля основан на цифровых технологиях регистрации и обработки изображений поверхности материала. Компьютерная обработка изображений, последовательно регистрируемых в процессе нагружения материала, позволяет измерять его пластическую деформацию путем построения поля векторов смещений элементарных участков поверхности.

На сегодняшний день существует несколько известных подходов к решению трудоемкой задачи построения поля векторов смещений, одним из которых является метод оптического потока. На практике широко используют его частный случай – метод корреляции цифровых изображений (МКЦИ), характеризуемый сравнительно низкой погрешностью измерений и высоким пространственным разрешением. Однако, МКЦИ требует больших вычислительных затрат, что связано с высоким временем расчета коэффициента корреляции и значительным количеством вариантов перебора при нахождении искоемых координат вектора смещения. Современные компьютеризированные системы, применяемые для решения задач оценки деформации, в основе своего математического обеспечения используют МКЦИ и зачастую демонстрируют недостатки, связанные с высокой вычислительной сложностью, присущие корреляционному подходу.

Уменьшение вычислительной сложности МКЦИ возможно с использованием новых подходов к обработке и анализу оптических изображений. Так, в последнее время большой интерес исследователей вызывает перспективное направление, связанное с применением теории фрактального анализа в задачах оценки деформации материалов по их оптическим изображениям. Фундаментальные и прикладные аспекты теории фракталов применительно к решению задач анализа цифровых оптических изображений

можно найти в многочисленных работах отечественных и зарубежных ученых (Иванова В.С., Шанявский А.А., Баланкин А.С, Бунин И.Ж., Оксогоев А.А., Кулак М.И., Панин А.В., Шугуров А.Р., Кузнецов П.В., Сан В., Лам Н., Ральф Б., Тейт Н. и др.).

Методы фрактального анализа поверхности, основанные, главным образом, на оценке фрактальной размерности (ФР) изображения, отличаются гораздо большей вычислительной эффективностью по сравнению с традиционными корреляционными методами. При этом ФР может быть использована в качестве критерия предварительной оценки деформации материала в условиях его механического нагружения. Представляется перспективным комплексное использование корреляционного и фрактального подходов для создания эффективных систем и средств производительной оценки деформации по оптическим изображениям, позволяющих объединить преимущества этих подходов.

Все вышесказанное показывает, что задачи разработки эффективных методов и алгоритмов анализа оптических изображений для оценки деформации, а также создание на их основе производительных систем контроля механического состояния материала по-прежнему представляют большую сложность и в условиях возрастающего количества данных и повышения требований к скорости их обработки и анализа остаются очень актуальными.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является создание математического и программного обеспечения производительной системы оценки деформации (СОД) для контроля механического состояния материалов по разновременным оптическим изображениям.

Для реализации поставленной цели необходимо последовательное решение следующих задач:

1. Создание концепции построения системы оценки деформации по оптическим изображениям, отличающейся высокой производительностью. При этом должны быть определены базовые принципы производительной оценки деформации материала.

2. Разработка математического обеспечения (методов и алгоритмов) производительной системы оценки деформации. Решение данной задачи предполагает также исследование эффективности предлагаемых методов и алгоритмов.

3. Разработка программного обеспечения производительной системы для оценки деформации по оптическим изображениям. Результатом решения этой задачи должны явиться программные средства, реализующие сформулированную концепцию и разработанные методы и алгоритмы.

4. Апробация разработанной производительной системы оценки деформации на примере решения прикладной задачи контроля механического состояния конструкционной стали 10Г2С.

Методы исследований. В работе использованы методы фрактального анализа, статистического моделирования, корреляции цифровых изображений и объектно-ориентированного программирования. Проверка эффективности

методов оценки ФР по точности и вычислительной сложности, а также оценка достоверности полученных результатов осуществлялись путем проведения численных экспериментов с использованием модельных данных и реальных разновременных оптических изображений поверхности материала.

Научную новизну полученных результатов определяют:

1. Подход к контролю механического состояния материала, заключающийся в предварительной экспресс-оценке значимой деформации на основе фрактального анализа оптических изображений поверхности, позволяющий значительно увеличить вычислительную эффективность процесса измерения деформации материала.

2. Алгоритм линейных преобразований фрактальных оценок, позволяющий получать несмещенные значения фрактальной размерности оптических изображений.

3. Помехоустойчивый метод согласования фрактальных оценок, позволяющий получать несмещенные значения фрактальной размерности при наличии аддитивных и мультипликативных шумов.

4. Результаты исследования эффективности разработанного математического обеспечения СОД с использованием модельных и оптических изображений поверхности материала.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Практически значимыми являются созданные методы, алгоритмы и программные средства производительной системы оценки деформации «FracMetter» для решения задач контроля механического состояния материалов по разновременным оптическим изображениям. Предложенная концепция построения производительной системы оценки деформации по оптическим изображениям, а также ее математическое и программное обеспечение могут быть использованы при совершенствовании существующих и во вновь создаваемых систем. Кроме того, практически ценным является разработанное программное обеспечение для создания модельных изображений с различными значениями фрактальной размерности, позволяющее проводить анализ эффективности методов получения фрактальных оценок. Программные средства системы «FracMetter» функционируют на компьютерах типа IBM PC под управлением операционной системы Windows XP/VISTA/7. Объем исходного кода системы составляет более 7000 строк на языке C++.

Созданные программные средства были апробированы при решении задачи аттестации качества изготовления корпуса глубинного манометра – термометра «САМТ-02-25». Полученные в ходе решения данной задачи результаты, алгоритмическое и программное обеспечение системы «FracMetter» внедрены в ООО «ТНПВО «СИАМ». Внедрение подтверждено соответствующим актом.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Подход к контролю механического состояния материала, заключающийся в предварительной экспресс-оценке значимой деформации на основе фрактального анализа оптических изображений, позволяет значительно увеличить вычислительную эффективность процесса определения деформации

материала без существенной потери точности по сравнению с традиционным корреляционным подходом.

2. Алгоритм линейных преобразований фрактальных оценок изображений позволяет получать несмещенные значения фрактальной размерности во всем диапазоне оцениваемых значений.

3. Помехоустойчивый метод согласования фрактальных оценок позволяет получать уточненные значения фрактальной размерности по сравнению с традиционными методами фрактальной оценки при наличии аддитивных и мультипликативных шумов.

4. Разработанное математическое и программное обеспечение производительной системы оценки деформации «FracMetter» позволяет решать задачу контроля механического состояния материалов с использованием оптических изображений их поверхности.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: IV Ставеровских чтениях: Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г.Красноярск, 2006), VI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиноведения» (г.Гомель, 2006), Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (г.Томск, 2006), III Российской научно-технической конференции «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций» (г.Екатеринбург, 2007), Второй международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (г.Москва, 2007), V Всероссийской конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (г.Екатеринбург, 2008), XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г.Томск, 2008), XV Всероссийской научно-методической конференции «Телематика 2008» (г.Санкт-Петербург, 2008), XLVII международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (г. Нижний Новгород, 2008), Международной школы-семинара «Многоуровневые подходы в физической мезомеханике. Фундаментальные основы и инженерные приложения» (г.Томск, 2008), Международной научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» (г.Томск, 2008), Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г.Новосибирск, 2008), XXXVIII Уральский семинар «Механика и процессы управления» (г.Екатеринбург, 2008), IV Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г.Екатеринбург, 2008), XVII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» (г.Самара, 2008), Третьей международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (г.Москва, 2008), Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (г.Томск, 2009), XXIX Российской школы, посвященной 85-летию со дня рождения академика В.П. Макеева (г.Екатеринбург, 2009), VI Всероссийской

конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (г.Екатеринбург, 2010).

По результатам работы имеется 30 публикаций, в том числе 6 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 1 свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад:

1. Постановка задач создания метода оценки значимой деформации по одновременным оптическим изображениям на базе фрактального анализа и исследование их эффективности выполнены автором совместно с д.т.н. В.С. Плешановым.

2. Разработка концепции построения производительной системы оценки деформации по оптическим изображениям выполнена автором совместно с к.т.н. А.В. Замятиным.

3. Программная реализация алгоритмов генерации модельных фрактальных поверхностей и методов оценки ФР выполнена лично автором.

4. Разработка моделей поведения поликристаллической структуры в условиях статического растяжения материала выполнена д.ф.-м.н. В.А. Романовой, а экспериментальное определение численной зависимости ФР от деформации материала с использованием методов фрактального анализа и разработанных моделей получено лично автором.

5. Разработка математического и алгоритмического обеспечения предварительной оценки значимой деформации, а также экспериментальное получение численной зависимости ФР от деформации материала на основе реальных изображений поверхности материала выполнены лично автором.

6. Постановка задачи исследования эффективности работы методов оценки фрактальной размерности на модельных изображениях при наличии шумов выполнена автором совместно с к.т.н. В.В. Кибиткиным; при этом разработка моделей зашумленных изображений и проведение их анализа выполнены лично автором.

7. Разработка программного обеспечения производительной системы оценки деформации «FracMetter» для контроля механического состояния материалов выполнена лично автором.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 124 наименований и приложений. Объем основного текста диссертации составляет 119 страниц машинописного текста, иллюстрированного 51 рисунком и 1 таблицей.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность работы в данном научном направлении, формулируются цель и задачи исследования, показывается научная новизна и практическая значимость полученных результатов и приводится краткое содержание работы по главам.

В первой главе раскрываются проблемы разработки и применения МНК, рассматриваются особенности прикладных задач оценки деформации материалов, показывается роль МНК в решении этих задач. Приводится

классификация основных существующих на сегодняшний день МНК, а также раскрывается область использования и пределы применимости МНК, базирующихся на различных принципах.

Анализируются основные подходы к оценке деформации с использованием традиционных оптических МНК, таких как метод фотоупругости, методы делительных сеток и муара, теневой оптический метод каустик, голографические методы когерентной оптики, метод спекл-интерферометрии. Раскрывается содержание задач анализа оптических изображений при оценке деформации.

Описываются существующие проблемы создания эффективных систем оценки деформации на базе оптических методов контроля.

Рассматривается перспективный метод фрактального анализа для оценки деформации по разновременным оптическим изображениям поверхности материала. Преимуществами метода являются высокая чувствительность к морфологии поверхности, низкая вычислительная сложность, слабое влияние условий освещения, а также независимость от пространственных поворотов цифровой камеры при съемке. Проведен обзор особенностей традиционных методов оценки ФР D таких как *метод треугольных призм*, «*box-counting*» (BC), *вариаций*, *вариограмм*, *изаритм*, *итерационных покрытий*, *Пентланда* и *вероятностный метод*.

На основе результатов анализа состояния проблемы оптических МНК для оценки деформации при решении прикладных задач контроля механического состояния материалов формулируются цель и задачи исследований в диссертационной работе.

Во второй главе предлагается концепция построения производительной СОД по оптическим изображениям, формулируются основные принципы концепции оценки деформации.

Предлагаемая концепция построения производительной системы включает процедуру оценки деформации и базируется на ряде сформулированных в работе принципов:

1. Для определения количественных характеристик деформации материала с высокой точностью по оптическим изображениям необходимо использовать современный корреляционный подход, позволяющий получать поля векторов смещений и значения компонент тензора пластической деформации.

2. Для увеличения производительности процесса обработки оптических изображений при получении численных значений деформации необходимо использовать методы фрактального анализа, позволяющие проводить предварительную экспресс-оценку значимой деформации и, тем самым, уменьшать объем данных, обрабатываемых трудоемким корреляционным подходом.

3. В рамках предварительной экспресс-оценки значимой деформации необходимо использовать методы и алгоритмы, позволяющие получать оценки фрактальной размерности, несмещенные в широком диапазоне значений, а также устойчивые к влиянию шумов.

Согласно первому принципу предложенной концепции в рамках процедуры оценки деформации необходимо использовать высокоточный корреляционный

метод – МКЦИ. В работе рассматриваются основные функциональные недостатки МКЦИ, связанные с большой вычислительной сложностью используемого в его основе корреляционного алгоритма, проявляющиеся при обработке большого количества разновременных оптических изображений.

Оценка вычислительной сложности МКЦИ проводилась на примере обработки большого количества разновременных пар элементов (микроизображений) образца конструкционной стали 10Г2С в процессе нагружения. В ходе эксперимента было получено 1000 микроизображений.

Все исследования в работе выполнялись на ПК со стандартными характеристиками (процессор Intel Core 2 DUO E7400; объем оперативной памяти 2 Gb).

В течение k итераций процедура производила обработку с помощью МКЦИ значительного количества разновременных микроизображений ЭМ (эталонных микроизображений) и ТМ (текущих микроизображений) (рис. 1). Их суммарное количество равно $T_{am} = (k - 1) \cdot m \cdot n$, где $m \times n$ – размер массива микроизображений St_k . На обработку одной пары микроизображений размером 1280×1024 пикселей с использованием МКЦИ уходит порядка $T_o = 180$ с при $m = 3$, $sc = 112$, $s = 56$, $s = 56$. При длительности процесса нагружения 50 итераций полное время расчета составит $T_3 = T_{am} \cdot T_o = 49 \cdot 3 \cdot 7 \cdot 180 = 185220$ с или чуть более 2-х суток.

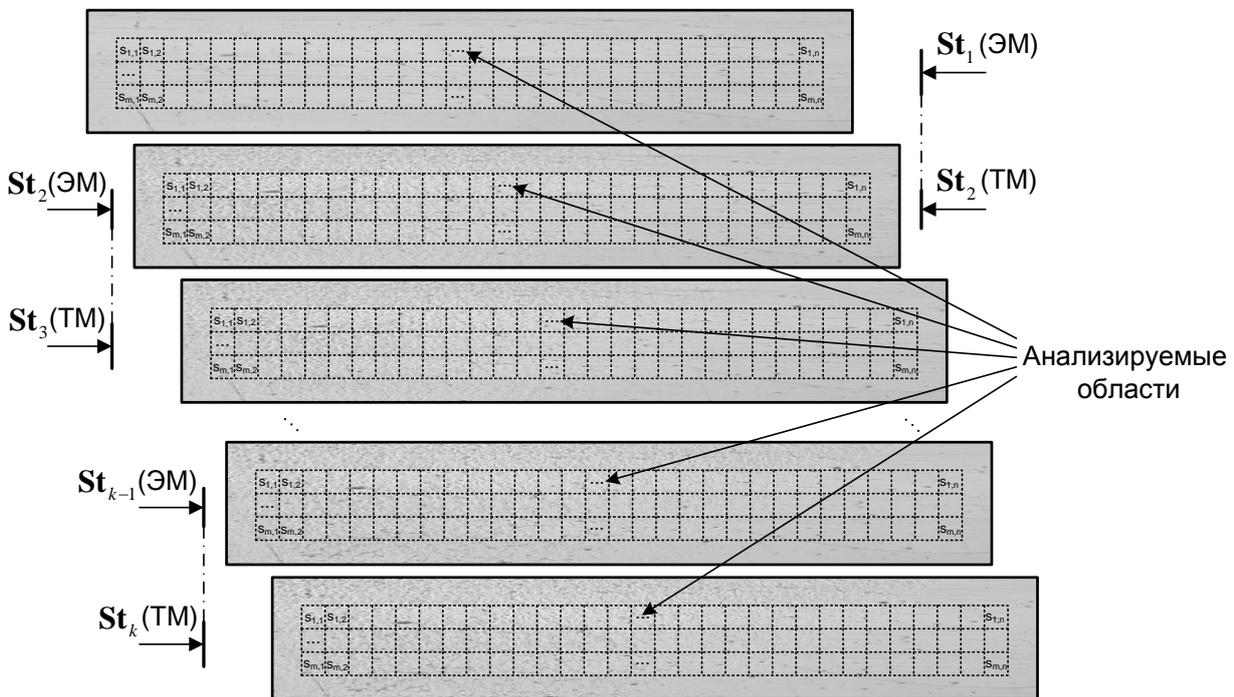


Рис. 1. Реализация способа исследования материала на базе процедуры оценки деформации

При этом в ходе обработки разновременных оптических изображений поверхности материала в процессе нагружения в массивах ЭМ и ТМ значительную долю составляют микроизображения, не имеющие значимой деформации и составляющие, так называемые, «белые пятна» полей данных.

Как, в частности, было обнаружено при исследовании многоциклового усталости сварных соединений стали 10Г2С, доля таких данных может колебаться в пределах 15÷60% от общего количества всех разновременных микроизображений. Обработка этих «белых пятен» с помощью МКЦИ является нецелесообразной с вычислительной точки зрения, т.к. требует выполнения множества холостых операций.

По результатам исследования делается вывод о необходимости решения задачи увеличения производительности процедуры оценки деформации на базе МКЦИ.

Согласно второму принципу предложенной концепции для увеличения производительности СОД автором предлагается идея включения в ее работу дополнительного модуля предварительной оценки деформации (МПОД).

Приводятся результаты увеличения производительности СОД после включения в ее работу МПОД на примере обработки большого количества разновременных пар элементов (микроизображений) образца конструкционной стали 10Г2С в процессе нагружения.

Учитывая, что в ходе эксперимента регистрируется 1000 микроизображений, из которых $S_p = 250$ не имеют значимой деформации, можно оценить время выполнения холостых операций $T_n = 180 \cdot 250 = 45000$ с или 13 часов. Это время можно сократить с помощью МПОД, проводя быструю экспресс-оценку значимой деформации.

В среднем время расчета ФР оптического изображения размером 1280×1024 пикселей занимает около одной секунды, что составляет менее 5% времени расчета МКЦИ. Таким образом, общее время расчета зависит от количества холостых операций, а выигрыш по времени изменяется в пределах 15÷70%.

Таким образом, использование экспресс-оценки на основе расчета ФР оптических изображений на наличие значимой деформации представляет собой **новый подход, позволяющий увеличить вычислительную эффективность процедуры оценки деформации при контроле механического состояния материала.**

Рассматривается описание алгоритмов генерации модельных изображений с высокой степенью самоподобия с заданными значениями ФР и приводятся результаты исследования эффективности по критериям точности и вычислительной сложности традиционных методов оценки ФР на основе сгенерированных модельных изображений.

Для исследования традиционных методов оценки ФР были созданы 270 модельных изображений с заранее известными значениями ФР D_g . Размер изображений составлял 512×512 пикселей при 256 градациях серого. Значения ФР D_g задавались в диапазоне $2,1 \leq D_g \leq 2,9$ с шагом $\Delta D_g = 0,1$. Для каждого заданного значения ФР D_g создавались 10 модельных изображений, а результаты оценки ФР полученных изображений усреднялись D_{cp} .

На рис. 2 показаны полученные зависимости значений D_{cp} , рассчитанных методами *треугольных призм*, «*box-counting*» (BC), *вариаций*, *вариограмм*, *изаритм*, *итерационных покрытий*, *Пентланда* и *вероятностным методом*, от заранее заданных значений ФР D_g модельных изображений, полученных с помощью алгоритмов генерации фрактальных поверхностей на основе Фурье фильтрации (рис. 2а), смещений средней точки (рис. 2б) и угловых смещений (рис. 2в). Критерием качества как методов измерения ФР, так и алгоритмов генерации фрактальных поверхностей является условие $D_{cp} = D_g$.

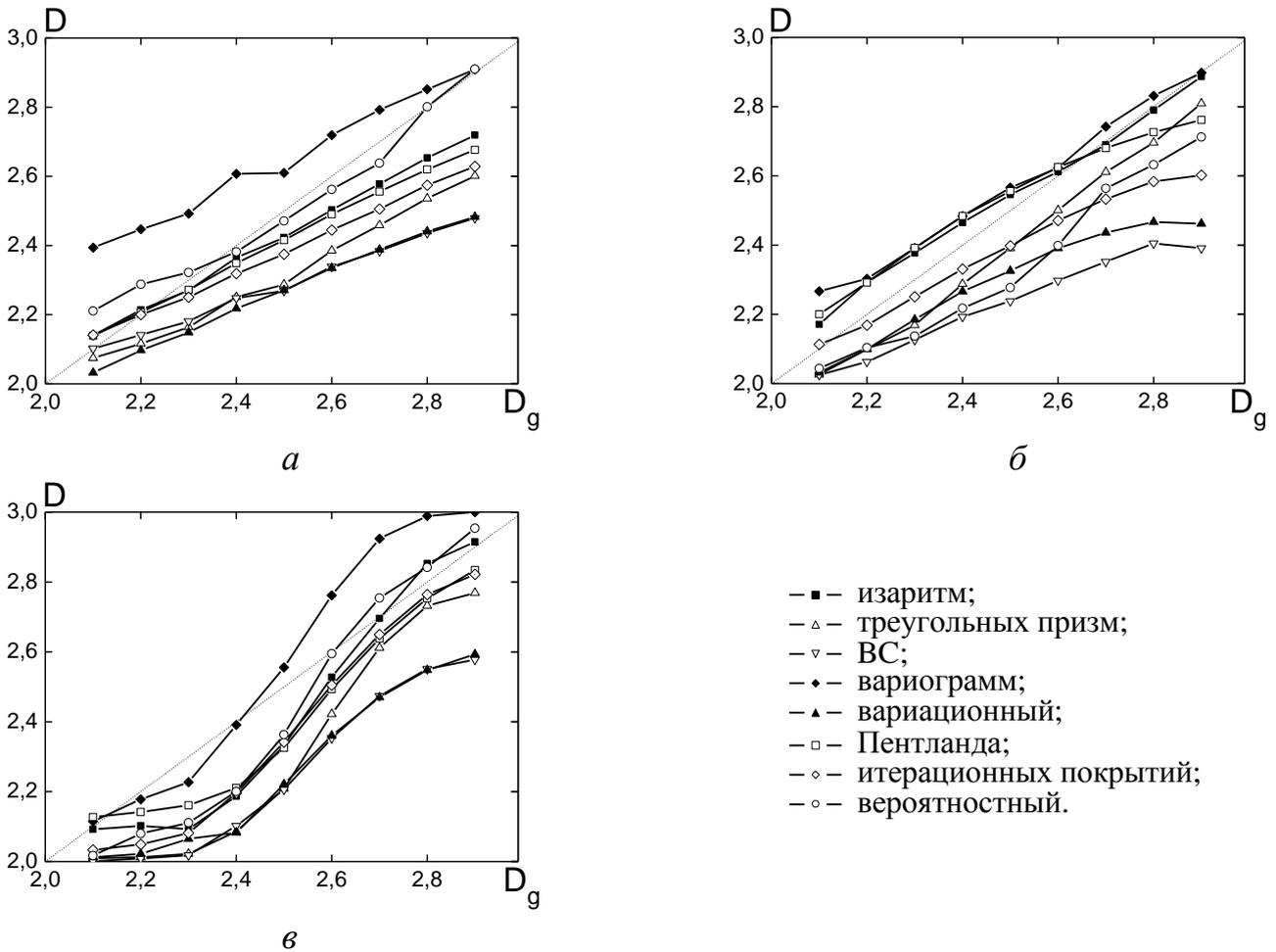


Рис. 2. Зависимости D_{cp} от заданных значений D_g для изображений, полученных алгоритмами Фурье фильтрации (а), смещений средней точки (б) и угловых смещений (в)

В результате исследований показано, что наиболее эффективными методами оценки ФР являются методы изаритм, Пентланда и треугольных призм по соотношению точности и вычислительной сложности.

Описывается методика численного моделирования поведения материала под нагрузкой методом пошагового заполнения конечного объема структурными элементами (*step-by-step packing - SSP*).

Приводятся результаты численного моделирования упруго-пластического поведения материала при статической нагрузке с использованием метода SSP. Выполняется исследование взаимосвязи ФР и пластической деформации ε на

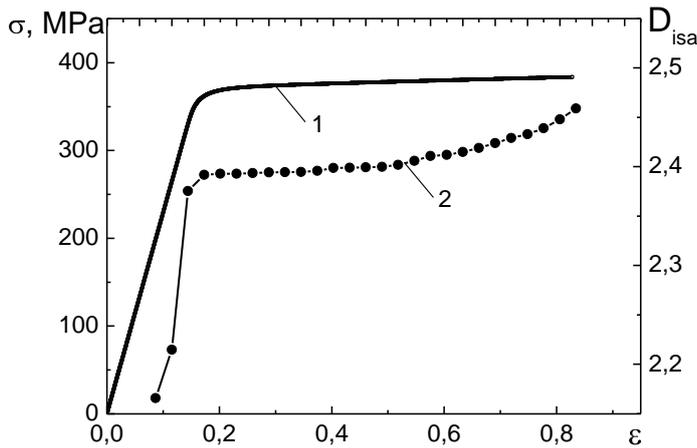


Рис. 3. Зависимость напряжения течения σ (1) и ФР D_{isa} (2) от степени деформации ϵ

вывод о том, что ФР изображения поверхности материала принципиально может быть использована как критерий значимой деформации материала.

Таким образом, полученная в результате проведенного исследования взаимосвязь ФР и деформации доказывает принципиальную возможность использования фрактального анализа для проведения экспресс-оценки значимой деформации материала с помощью МПОД.

Формулируются основные требования к предложенной концепции системы оценки деформации по оптическим изображениям, а также определяются базовые принципы ее построения.

Третья глава посвящена разработке математического обеспечения МПОД.

Согласно третьему принципу предложенной концепции СОД для проведения предварительной экспресс-оценки необходимо использовать методы и алгоритмы, позволяющие получать оценки ФР, несмещенные в широком диапазоне значений, а также устойчивые к шумовым помехам на оптических изображениях.

Как показал анализ наиболее распространенных методов оценки ФР большинство из них либо занижают, либо завышают истинное значение ФР D_g , т.е. получаемые оценки ФР являются смещенными.

Для решения указанной проблемы автором предлагается **алгоритм получения несмещенных**

оценок ФР, основанный на линейных преобразованиях. Идея алгоритма заключается в аппроксимации градуировочной (рис. 2а) кривой линейной



Рис. 4. Обобщенная схема алгоритма линейаризации

зависимостью (методом наименьших квадратов) и ее последующим линейным преобразованием к идеальной прямой $D = D_g$.

Обобщенная схема алгоритма линейных преобразований фрактальных оценок приведена на рис. 4. На **первом шаге** алгоритм загружает массив значений ФР $\mathbf{Dl}_i (i = \overline{1, N})$, где N количество элементов, корректируемого метода, а также истинные значения ФР $\mathbf{D}_{gi} (i = \overline{1, N})$, изменяющиеся в диапазоне $2,1 \leq D_g \leq 2,9$ с шагом $\Delta D_g = 0,1$. При этом шаг ΔD_g может варьироваться. На **втором шаге** методом наименьших квадратов по значениям массивов \mathbf{Dl}_i и \mathbf{D}_{gi} находятся коэффициенты a и b . На **третьем шаге** запускается цикл перебора значений ФР из массива \mathbf{Dl}_i . Для каждого из значений ФР массива \mathbf{Dl}_i выполняются линейные преобразования $\mathbf{d}_i (i = \overline{1, N})$ (**шаг четыре**). На выходе алгоритма после обработки всех значений ФР массива \mathbf{Dl}_i получается массив преобразованных значений \mathbf{d}_i .

Показаны результаты устранения смещенности оценки ФР методами изаритм (рис. 5а) и треугольных призм (рис. 5б) после применения линейных преобразований. Использование предложенного алгоритма линейных преобразований позволяет устранить смещенность ФР лишь при отсутствии шумов на изображении. Однако, оптические изображения всегда регистрируются с некоторой погрешностью, связанной, в первую очередь, с физическими процессами, протекающими в ходе съемки оптической камерой.

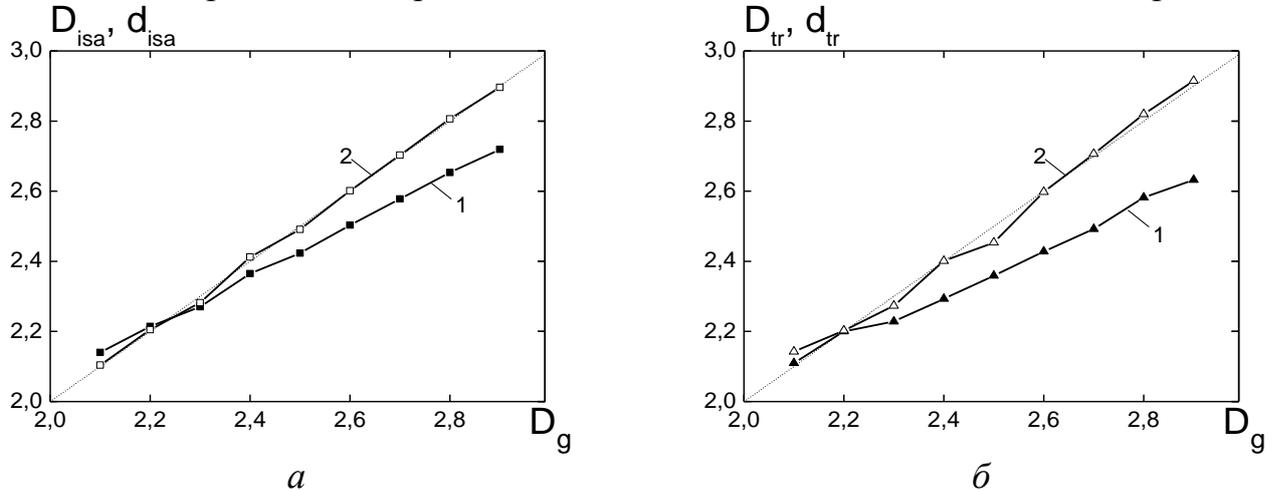


Рис. 5. Зависимости измеренных значений ФР от заданных значений до (1, D) и после (2, d) линейного преобразования для методов изаритм (а) и треугольных призм (б)

При оценке ФР оптических изображений в условиях помех проблема минимизации влияния шума является весьма актуальной. Для решения указанной проблемы автором проведено исследование влияния шумов на оценки ФР с использованием методов треугольных призм и изаритм, обладающих хорошим соотношением точности и вычислительной сложности. Исследование проводится с использованием модельных изображений с заданной ФР,

содержащих мультипликативный шум β (средний размах мультипликативного шума), изменяющийся в диапазоне $0,01 \leq \beta \leq 0,06$, с шагом $\Delta\beta = 0,01$,

Демонстрируются результаты проведенных исследований, показывающие, что получаемые методами изаритм (рис. 6а) и треугольных призм (рис. 6б) оценки ФР сильно зависят от зашумленности изображений, что особенно проявляется в рабочем диапазоне значений ФР – $2,0 \leq D \leq 2,6$. Следует заметить, что более чувствительным к шумовой составляющей на изображении является метод изаритм, который демонстрирует значительное влияние шума на всем диапазоне значений ФР. Метод треугольных призм при этом показывает слабую чувствительность к шуму, однако сильно занижает значения ФР как в условиях зашумленных, так и незашумленных модельных изображений.

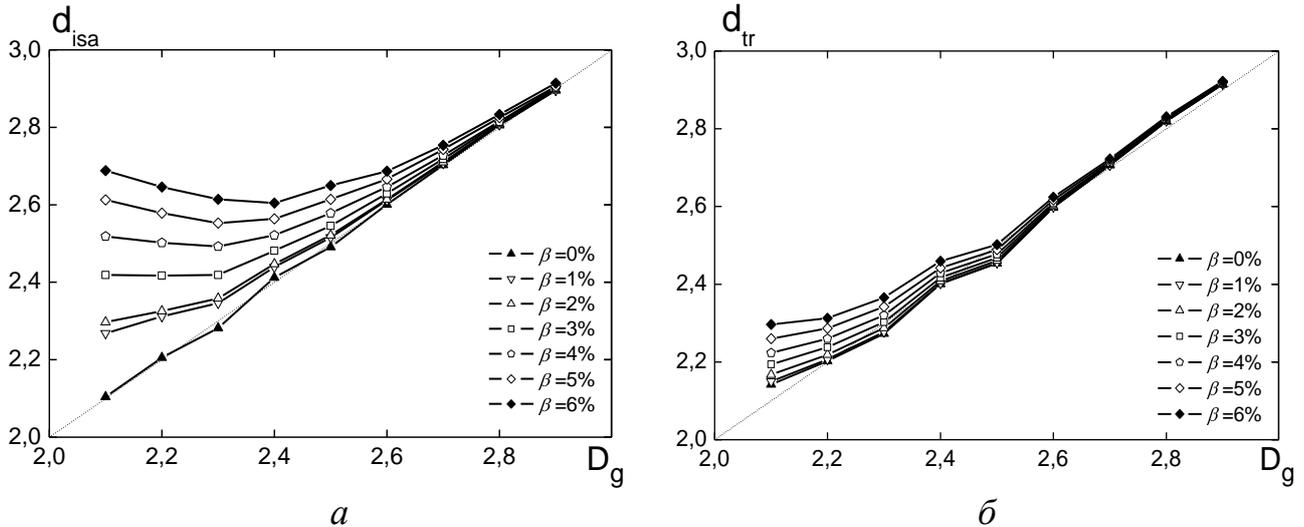


Рис. 6. Зависимости значений ФР после линейных преобразований d , измеренных методами изаритм (а) и треугольных призм (б) для изображений с мультипликативным шумом $0,01 \leq \beta \leq 0,06$

Для преодоления вышеуказанных проблем автором предлагается **оригинальный помехоустойчивый метод согласования фрактальных оценок**, устойчивый к шумам на оптических изображениях. Метод рассмотрен на примере задачи компенсации мультипликативного шума на модельных изображениях.

Для диапазона ФР $2,1 \leq D_g \leq 2,9$ зависимости $d(D_g, \beta)$ для каждого из методов треугольных призм и изаритм аппроксимировались плоскостью, параметры которой определялись методом наименьших квадратов. В результате была получена система трех линейных алгебраических уравнений:

$$d_{isa\beta} = 0,595D_g + 3,91\beta + 0,989, \quad (1)$$

$$d_{tr\beta} = 0,917D_g + 1,128\beta + 0,197. \quad (2)$$

где $d_{isa\beta}$, $d_{tr\beta}$, – скорректированные значения ФР, рассчитанные методами изаритм и треугольных призм соответственно.

Решая систему уравнений (1)-(2), можно найти значения $d_{cor\beta}$, так и уровень мультипликативного (β) шума:

$$d_{cor\beta} = 1,341d_{tr\beta} - 0,387d_{isa\beta} + 0,118,$$

$$\beta = 0,314d_{isa\beta} - 0,204d_{tr\beta} - 0,27.$$

Конкретные числовые значения коэффициентов уравнений (1)-(2) зависят от условий и методики моделирования.

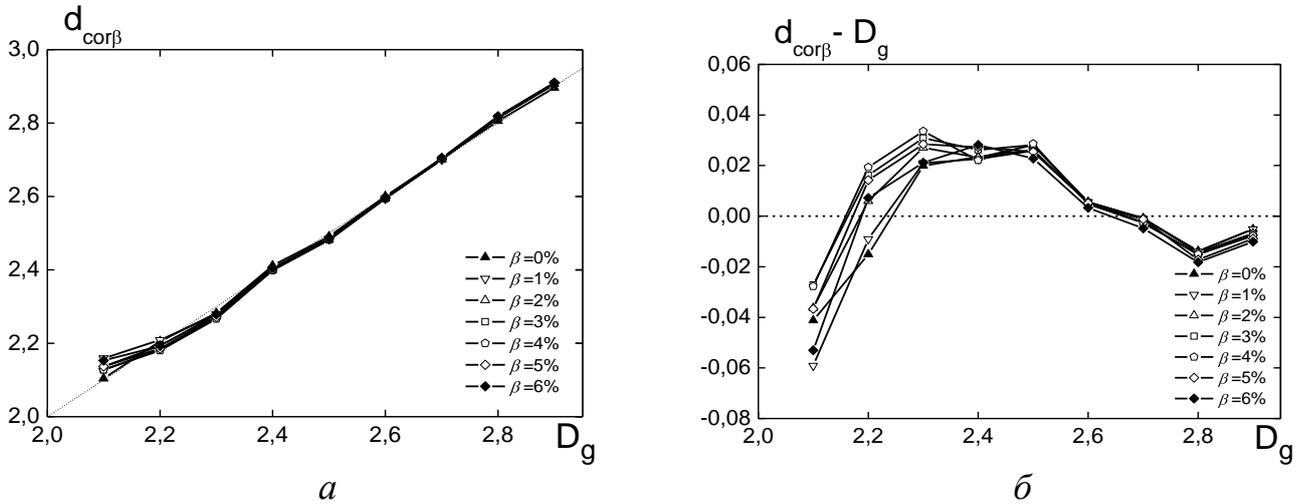


Рис. 7. Зависимость скорректированных значений ФР (а) и ошибка оценки (б) после применения метода согласования для изображений с мультипликативным шумом $0,01 \leq \beta \leq 0,06$

На рис. 7 представлены зависимости скорректированных значений ФР $d_{cor\beta}$ (а) и абсолютной погрешности $d_{cor\beta} - D_g$ (б) от заранее заданных значений ФР

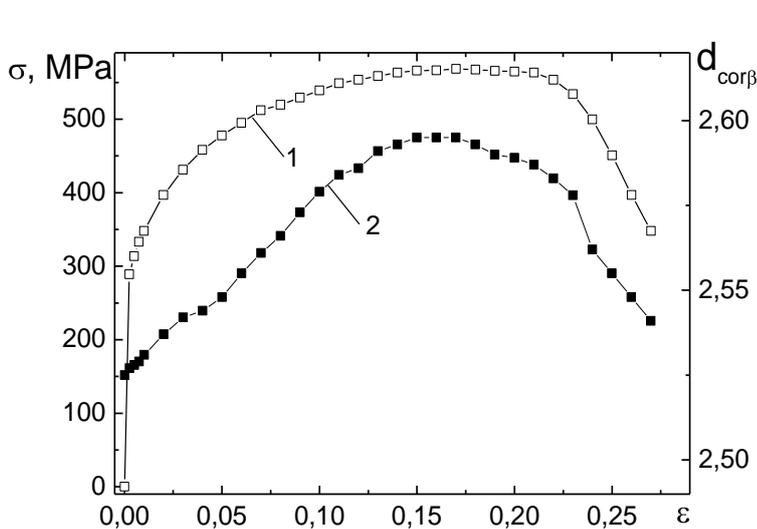


Рис. 8. Зависимость напряжения течения σ (1) и ФР $d_{cor\beta}$ (2) от степени деформации ε

D_g зашумленных модельных изображений. Видно, что влияние шума на значения ФР $d_{cor\beta}$ после корректировки уменьшилось приблизительно на порядок ($|d_{cor\beta} - D_g| \leq 0,06$).

Возможность применения данного метода проверена также для случаев аддитивного шума и при совместном влиянии аддитивного и мультипликативного шумов. Как и в случае с мультипликативным шумом удалось практически нивелировать их влияние.

Таким образом, предложенный помехоустойчивый метод согласования фрактальных оценок позволяет получать точные результаты измерения ФР на оптических изображениях в условиях влияния шумов.

Приводятся результаты исследования эффективности метода согласования фрактальных оценок на реальных оптических изображениях поверхности алюминиевого сплава Д16АТ при статическом нагружении (рис. 8).

Получена численная оценка степени связи кривой нагружения и кривой изменения значений ФР в виде коэффициента линейной корреляции, который составил $R_k = 0,87$.

Это позволяет сделать вывод о наличии связи между значением ФР оптических изображений и деформации материала, что позволяет обнаруживать значимую деформацию с помощью фрактального анализа.

В четвертой главе описывается программное обеспечение производительной системы оценки деформации «FracMetter» (рис. 9) и приводятся результаты ее апробации при решении задачи контроля механического состояния материала под нагрузкой.

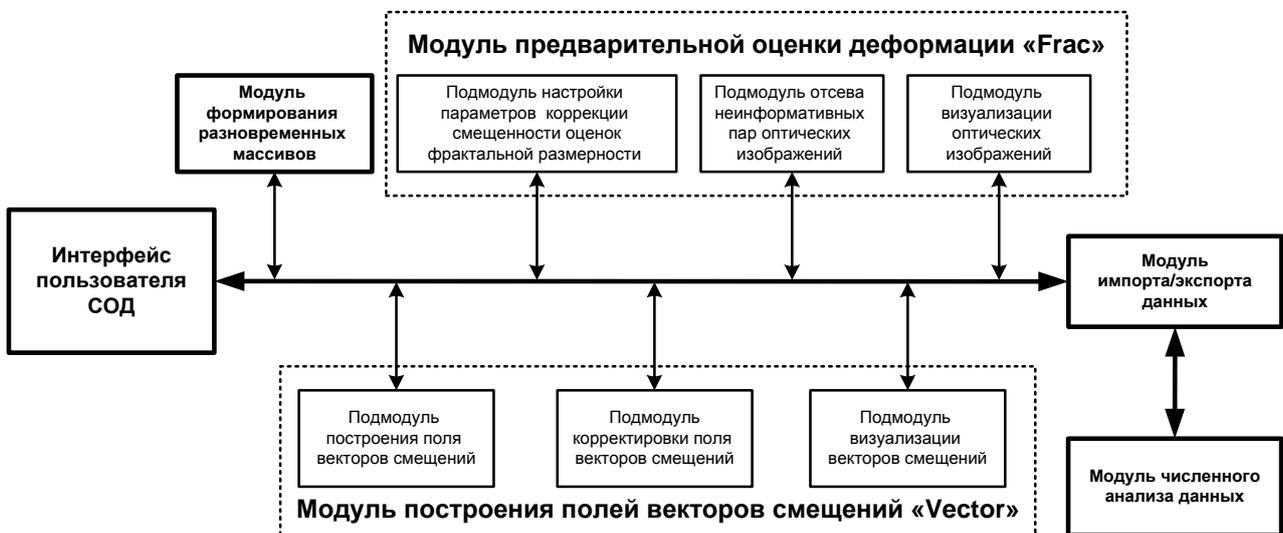


Рис. 9. Обобщенная структура программного обеспечения СОД «FracMetter»

Оригинальными программными компонентами СОД «FracMetter» являются МПОД, реализованный в виде программного обеспечения «Frac», и модуль построения полей векторов смещений (МППВС), реализованный в виде программного обеспечения «Vector».

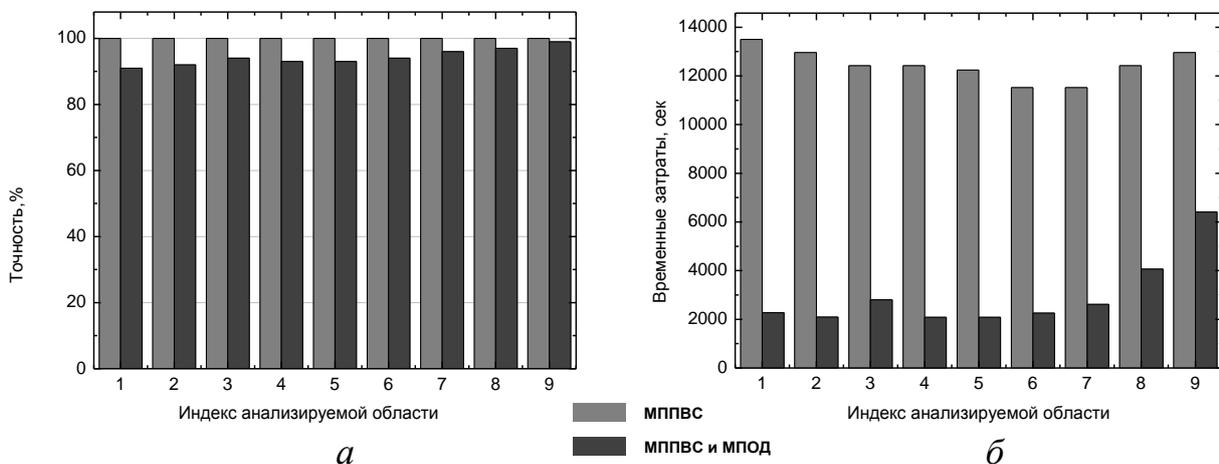


Рис. 10. Оценка точности (а) и временных затрат (б) определения значимой деформации

Демонстрируются результаты применения СОД для уменьшения вычислительной сложности процесса оценки деформации на примере эксперимента с конструкционной сталью 10Г2С при циклическом нагружении. В ходе эксперимента было получено 622 микроизображения.

Для демонстрации эффективности обработки микроизображений с помощью МПОД в составе СОД «FracMetter» приводится диаграмма численных оценок точности обнаружения пар микроизображений со значимой деформацией (рис. 10а). Из диаграммы видно, что точность, достигаемая с помощью МПОД, находится на уровне 93%, т.е. доля пропущенных микроизображений составляет около 7%.

Показываются диаграммы результатов определения временного выигрыша при оценке значимой деформации (рис. 10б). Видно, что использование МПОД позволило увеличить вычислительную эффективность СОД «FracMetter» на 76%.

Также в работе показано, что деформация связана с отношением текущего числа циклов нагружения к общему числу циклов (циклическим отношением) через зависимость, подобную закону Мэнсона – Коффина. Оценивая значение циклического отношения по тому или иному параметру (деформации, скорости роста трещины, амплитуды или скорости раскрытия ее вершины) и зная время работы материала, можно контролировать его текущее механическое состояние.

Описывается внедрение способа аттестации качества изготовления корпуса глубинного манометра - термометра «САМТ-02-25» с использованием средств системы «FracMetter» в ООО «ТНПВО «СИАМ».

Все приведенные выше результаты апробации СОД подтвердили достоверность результатов выполненных исследований, а также показали высокую эффективность созданного математического и программного обеспечения системы при решении прикладных задач.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

В приложение вынесен акт о внедрении полученных результатов.

Основные результаты работы

1. Предложена концепция построения производительной системы оценки деформации, отличающаяся высокой вычислительной эффективностью и включающая основные этапы обработки оптических изображений при контроле текущего механического состояния материала.

2. Предложен подход к контролю механического состояния материала, заключающийся в предварительной экспресс-оценке значимой деформации на основе фрактального анализа, позволяющий в составе СОД увеличить вычислительную эффективность обработки больших массивов разновременных оптических изображений.

3. Разработан новый алгоритм линейных преобразований фрактальных оценок, позволяющий получать несмещенные значения ФР во всем диапазоне оцениваемых значений.

4. Предложен помехоустойчивый метод согласования фрактальных оценок, позволяющий получать скорректированные значения ФР при наличии

аддитивных и мультипликативных шумов, а также показана его эффективность на примере зашумленных модельных изображений.

5. Разработано программное обеспечение СОД «FracMetter», функционирующее на компьютерах типа IBM PC под управлением операционной системы Windows XP/VISTA/7. Объем исходного кода системы составляет более 7000 строк на языке C++.

6. Проведена апробация разработанного программного обеспечения СОД «FracMetter» на примере исследования эволюции деформации сварного соединения конструкционной стали 10Г2С при усталости и показана эффективность применения МПОД в составе СОД. Осуществлено внедрение способа аттестации качества изготовления корпуса глубинного манометра - термометра «САМТ-02-25» с использованием средств системы «FracMetter» в ООО «ТНПВО «СИАМ».

Основные публикации по теме диссертации

В рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Pleshanov V.S., Napryushkin A.A., Kibitkin V.V. Use of the theory of fractals in images analysis tasks // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2010. V.46, № 1, pp. 70 – 78.

2. Napryushkin A., Kibitkin V., Pleshanov V. Linear transformation based error correction algorithm for fractal dimension estimation of images // Signal Processing, 2010. V. 90, pp. 2094 – 2101.

3. Напряшукин А.А., Кибиткин В.В., Плешанов В.С. Компенсация погрешности измерения фрактальной размерности путем линейных преобразований // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2011. – №2. – С. 16 – 22.

4. Плешанов В.С., Кибиткин В.В., Напряшукин А.А., Солодушкин А.И. Измерение деформации материалов методом корреляции цифровых изображений // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т.312. № 2. С. 343 – 349.

5. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Плешанов В.С., Клименов В.А., Иванов Ю.Ф., Почивалов Ю.И., Кибиткин В.В., Напряшукин А.А., Нехорошков О.Н., Лукин В.И., Сапожников С.В. Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали ВКС-12 // Физическая мезомеханика – 2006. – Т. 9. – № 2. – С. 85 – 96.

6. Плешанов В.С., Панин В.Е., Клименов В.А., Кибиткин В.В., Почивалов Ю.И., Напряшукин А.А. Связь наноструктурирования поверхностного слоя с циклической долговечностью сварных соединений высокопрочной стали // Физическая мезомеханика – 2005. – Т.8. – Спец. выпуск – С. 105 – 108.

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ:

7. Напряшукин А.А., Кибиткин В.В., Плешанов В.С. Программа расчета значений фрактальной размерности изображений при измерении деформации //

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010615382. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20.08.2010.

В сборниках трудов и тезисов конференций:

8. Плешанов В.С., Напряшкин А.А., Солодушкин А.А., Сапожников С.В., Кибиткин В.В. Оценка механического состояния деталей машин и элементов конструкций методом оптического потока // Современные проблемы машиноведения: Тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции, Гомель, Беларусь. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2006. – С. 15.

9. Напряшкин А.А., Сапожников С.В., Плешанов В.С., Кибиткин В.В. Метод оценки деформации на основе фрактального анализа оптических изображений деформационного рельефа // Физическая мезомеханика, компьютерное конструирование и разработка новых материалов: Тезисы докладов международной конференции. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2006. – С. 349 – 350.

10. Напряшкин А.А., Сапожников С.В., Плешанов В.С. Фрактальный анализ деформируемой поверхности как метод определения остаточного ресурса элементов металлоконструкций // Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций: Тезисы докладов III Российской научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2007. – С. 20.

11. Напряшкин А.А., Плешанов В.С., Сапожников С.В., Кибиткин В.В. Фрактальный анализ как основа оценки остаточного ресурса нагруженных материалов // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: Сборник статей по материалам Второй международной конференции. – М.: ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, 2007. – С. 548 – 549.

12. Напряшкин А.А., Кибиткин В.В., Плешанов В.С. Выбор метода расчета фрактальной размерности для оценки степени накопления повреждений // Актуальные проблемы прочности: Материалы XLVII международной конференции. – Нижний Новгород, 2008. – Ч. 1. – С. 269 – 271.

13. Напряшкин А.А., Солодушкин А.И., Плешанов В.С., Кибиткин В.В. Автоматизация процесса получения и анализа оптических изображений для исследования механизмов деформации и разрушения материалов // Труды XV Всероссийской научно-методической конференции «Телематика 2008». – Санкт-Петербург, 2008. – Т. 1. – С. 267 – 268.

14. Напряшкин А.А., Кибиткин В.В., Плешанов В.С. Компенсация погрешности измерения фрактальной размерности при оценке механического состояния материала // Ресурс и диагностика материалов и конструкций: Тезисы докладов IV Российской научно-технической конференции. – Екатеринбург: ИМаш УрО РАН, 2009. – С. 8.

15. Кибиткин В.В., Плешанов В.С., Напряшкин А.А., Солодушкин А.И. Оценка остаточного ресурса сварных соединений методом корреляции цифровых изображений // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: Сборник материалов Третьей международной конференции. – М.: Интерконтакт Наука, 2009. – Т. 2. – С. 177 – 178.