

На правах рукописи

Любутий Павел Степанович

**АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА
АНАЛИЗА ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ ДЕФОРМАЦИИ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (отрасль: промышленность)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск-2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте физики прочности и материаловедения СО РАН

Научный руководитель: доктор технических наук,
доцент Панин Сергей Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Спицын Владимир Григорьевич

доктор технических наук,
профессор Фроловский Владимир Дмитриевич

Ведущая организация: Институт систем информатики
имени А.П. Ершова СО РАН (г. Новосибирск)

Защита состоится «23» декабря 2009 г. в 15-00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.06 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84/3, институт «Кибернетический центр» ТПУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «20» ноября 2009 г.

Ученый секретарь
совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
к.т.н., доцент

 М.А. Сонькин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время для оценки параметров деформации, а также для неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций разработан и используется целый ряд методов и средств. Их основными недостатками являются: низкая разрешающая способность; ограничение по классу анализируемых объектов и материалов; невысокая чувствительность; затраты на изготовление и эксплуатацию технических средств измерения. Помимо этого, существенной проблемой является автоматизация измерений при обработке большого количества экспериментальных данных, что привело к необходимости создания новых методов и средств оценки деформации.

Оптико-телевизионный способ исследований является одним из наиболее перспективных подходов для изучения процессов деформации и разрушения структурно-неоднородных материалов (металлов, сплавов, керамических материалов и т.п.). В основе способа лежит построение векторов перемещений, основанное на определении оптического потока. Существенный вклад в развитие исследований в данном направлении принадлежит Б.К.П. Хорну, У.К. Прэтту и др. Подход, основанный на пересчете полей векторов перемещений в карты деформации поверхности, получил развитие в группе проф. М. Саттона, в работах которого большое внимание уделяется анализу процессов распространения усталостных трещин, а основным анализируемым параметром является раскрытие трещины. В ИФПМ СО РАН для оценки деформации применяли метод спекл-интерферометрии в группе проф. Л.Б. Зуева, недостатком которого является низкая разрешающая способность. Экспериментальные исследования деформации и разрушения материалов путем построения полей векторов перемещений проводятся в группах проф. В.Е. Панина, а также д.т.н. В.И. Сырямкина в лаборатории систем технического зрения.

На данный момент оптико-телевизионный способ, это единственный подход, который позволяет выявлять и количественно аттестовывать области локализации деформации и разрушения с пространственным разрешением в пределах нескольких микрон.

Одной из наиболее значимых проблем при исследовании деформации и разрушения материалов является присутствие разрывов в поле перемещений (например, в местах трещин), что приводит к ошибкам определения деформации. Кроме того, при создании технических средств диагностирования, основанных на оптико-телевизионном подходе, необходимо решить вопросы, связанные с оперативностью проведения измерений. Не менее важным представляется повышение точности и чувствительности оптико-телевизионного способа оценки деформаций при небольших величинах ее приращения.

Таким образом, актуальной научно-технической проблемой является разработка быстродействующих, помехоустойчивых алгоритмов, позволяющих с высокой точностью проводить оценку деформации на поверхности материалов, исключая влияние разрывов в поле перемещений, а также при малых ее приращениях.

Целью настоящей работы является разработка алгоритмов и программных средств анализа оптических изображений поверхности материалов, обеспечивающих повышение точности определения деформации при малых ее приращениях, а также осуществить выбор параметров, количественно ее характеризующих. Кроме того, необходимо уменьшить вычислительные затраты для анализа изображений, а

также снизить ошибки определения деформаций, вызванные наличием разрывов в поле перемещений.

Для достижения поставленной цели, необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать алгоритм построения полей векторов перемещений и алгоритм их постобработки.
2. Разработать методику субпиксельного расчета перемещений участков изображения, основанную на бикубической интерполяции взаимной корреляционной функции (ВКФ).
3. Оптимизировать алгоритм нахождения перемещений участков изображения по вычислительным затратам.
4. Провести исследования алгоритмов расчета деформации на модельных изображениях, включая верификацию первых. Оценить точность и помехоустойчивость алгоритмов определения перемещений.
5. Разработать способы диагностики усталостного разрушения и аттестации свойств конструкционных материалов с использованием разработанных алгоритмов и программ и провести их апробацию при решении практически значимых для промышленности задач.

Научную новизну работы определяют:

1. Способ определения перемещений участков изображения поверхности материала, отличающийся от известных одновременным использованием нормированного коэффициента корреляции, алгоритма циклической буферизации и алгоритма поиска экстремума интерполяционного сплайна ВКФ через вычисление градиентов, что позволяет уменьшить вычислительные затраты и повысить точность расчета и помехоустойчивость способа.
2. Впервые предложены и реализованы методика и алгоритмы постобработки полей векторов перемещений, позволяющие исключать разрывы и некорректно определенные векторы в поле перемещений.
3. Способ и алгоритмы моделирования изображений, отражающих формоизменение поверхности, отличающиеся от известных тем, что дискретное пространственное распределение яркости преобразуется в непрерывное, производится его деформирование с последующей дискретизацией в формат цифрового изображения.
4. Методика верификации алгоритма оценки перемещений и определения деформации, основанная на сопоставлении результатов обработки серий модельных изображений и аналитических расчетов.

Практическую ценность работы составляет:

1. Реализованное алгоритмическое и программное обеспечение оптико-телевизионной системы для построения полей векторов перемещений и расчета деформации, включающее программные модули автоматической и ручной постобработки полей векторов перемещений.
2. Программное обеспечение для получения модельных изображений, отражающих различные схемы нагружения.
3. Программное обеспечение моделирования размытия изображений оптической системой и шума аппаратной части оптико-телевизионной измерительной системы.

4. Способ диагностики усталостного разрушения авиационных материалов и способ аттестации механических свойств керамических материалов.

Методы исследования. В качестве основных методов исследования в работе использованы методы обработки цифровых изображений, моделирования изображений на ЭВМ, теории вероятностей, математической статистики, теории оптимизации, теории принятия решений, физического моделирования.

Внедрение работы. Созданные программы являются неотъемлемой частью оптико-телевизионной измерительной системы "ТОМСК" и используются для проведения исследований различных материалов и сплавов в ИФПМ СО РАН. На программу построения векторов перемещений и расчета компонент деформации получен акт о регистрации программного обеспечения в Роспатенте.

Автор принимал участие в качестве ответственного исполнителя в работах по договору «Разработка оптического метода встроенного контроля высоконагруженных агрегатов планера» (№ БТ-ОНМК-01-08 от 23 июня 2008 г.) между ОАО «ОКБ Сухого» и Учреждением Российской Академии наук Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. Полученные результаты подтверждаются соответствующим актом внедрения. По результатам применения разработанного способа аттестации механических свойств керамических материалов в ОАО «Новосибирский Электровакуумный завод – Союз» и ООО «Нанокерамика» получены акты внедрения.

Апробация работы. Основные результаты работы отражены в 15 публикациях: 7 статей, 1 свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ, 7 тезисов докладов. Результаты работы были представлены на следующих конференциях:

X Юбилейная Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», посвященная 400-летию г. Томска, 29 марта – 2 апреля 2004 г.; Конференция-конкурс работ студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии Microsoft в информатике и программировании», Новосибирск, 22 – 24 февраля 2005 г.; XI Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 28 марта - 1 апреля 2005 г.; 7th International Conference on Mesomechanics, Montreal, Canada, August 1-4, 2005.; Третья всероссийская конференция молодых ученых "Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-м тысячелетии", Томск, 3–6 марта 2006 г.; XVIII Interdisciplinary Conference on Recent Advances in Science and Technology, DFL & CYI Tomsk Scientific Center SB RAS, May 24, 2006; Вторая международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» DFMN'2007, г. Москва, 8-11 октября 2007 г.

Личный вклад. Автором разработан алгоритм работы оптико-телевизионной измерительной системы, алгоритм расчета ВКФ, оптимизированный по вычислительным затратам, разработаны методика и алгоритмы постобработки полей векторов перемещений. Совместно с научным руководителем С.В. Паниным выполнена постановка задач диссертационного исследования, анализ и обсуждение результатов теоретических и практических исследований. Автором разработаны программы анализа оптических изображений для построения полей векторов перемещений и расчета компонент деформаций, программы моделирования оптических изображений поверхности образцов находящихся под нагрузкой, программа моделирования помех оптической системы и видеодатчика оптико-телевизионной измерительной

системы. Разработаны методики диагностики усталостного разрушения авиационных материалов и аттестации механических свойств керамических материалов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм работы оптико-телевизионной измерительной системы, основанный на построении векторов перемещений и последующем вычислении деформации, позволяющий выявлять и количественно характеризовать области локализации деформации путем расчета интенсивности деформации сдвига.
2. Алгоритм субпиксельной оценки перемещений участков изображений поверхности материалов, основанный на применении интерполирования ВКФ с использованием бикубического сплайна с последующим поиском его экстремума через вычисление градиентов, позволяющий повысить точность определения перемещений и последующей оценки деформации.
3. Методика и алгоритмы постобработки полей векторов перемещений, предназначенные для уменьшения ошибок оценки деформаций, предложенные впервые.
4. Способ и алгоритмы моделирования деформации, позволяющие получать модельные изображения с заданными статистическими параметрами при обеспечении высокой точности приращения деформации.
5. Способы диагностики усталостного разрушения авиационных материалов и аттестации механических свойств наноструктурной керамики, в основу которых положены результаты проведенных исследований.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она изложена на 186 страницах, содержит 58 рисунков, 5 таблиц, 6 приложений. Список литературы содержит 163 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, и приводится краткое содержание работы по главам.

В первой главе диссертации проведен аналитический обзор экспериментальных методов оценки деформаций и напряжений, методов оценки деформации, основанных на обработке оптических изображений, методов вычисления оптических потоков как методов оценки поля движения.

В разделе 1.1 приведен обзор экспериментальных неразрушающих оптических методов измерения деформаций, таких как метод спекл-интерферометрии, методы рассеянного света, метод, использующий фотоупругие покрытия, теневой оптический метод каустик.

В разделе 1.2 рассмотрены методы оценки деформации, основанные на обработке оптических изображений. Подход, основанный на пересчете полей векторов перемещений в карты деформации поверхности (surface strain mapping), получил значительное развитие в группе проф. М. Саттона (Sutton) в университете шт. Южная Каролина. Основное внимание при этом уделяется вопросам усталостного разрушения гетерогенных материалов. В частности, в результате многочисленных исследований, проведенных данной группой, был предложен критерий оценки интенсивности деформации при раскрытии трещины, основанный на вы-

числении параметра COD (crack opening displacement). Двумерный параметр COD вычисляется следующим образом:

$$COD_{2D} = [(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2]^{1/2}, \quad (1)$$

где $\Delta u, \Delta v$ – компоненты относительного смещения, в направлении вдоль оси x (вдоль направления трещины) и y (перпендикулярно трещине) соответственно. Компоненты смещения рассчитываются на заданном расстоянии ниже вершины трещины:

$$\Delta u = u^{above} - u^{below}, \quad \Delta v = v^{above} - v^{below}, \quad (2)$$

где $u^{above} (v^{above})$ и $u^{below} (v^{below})$ смещения в x и y направлениях для точек расположенных выше и ниже существующей линии трещины, соответственно.

Метод фрактального анализа в течение ряда лет используется в материаловедении. Понятие "фрактальная геометрия" было введено Б.Мандельбротом. В одной из работ Мандельброта впервые для анализа поверхности твердого тела был использован количественный показатель, названный "фрактальная размерность". Основой для применения метода послужило изменение рельефа металлической поверхности при нагружении.

Гармонический анализ является одним из старейших разделов прикладной математики. В связи с развитием интегральной технологии и с появлением эффективных алгоритмов гармонического анализа, позволяющих вычислять дискретное преобразование Фурье (ДПФ), гармонический анализ получил признание в практических разработках.

Вейвлет анализ относится к спектральным методам анализа изображений. Результатом вейвлет-преобразования является двумерный вейвлет-спектр, представляющий собой функцию двух переменных: времени и масштаба (частоты). Таким образом, основным достоинством вейвлет-преобразования, по сравнению с традиционным Фурье-анализом, является то, что оно позволяет оценивать, эволюцию спектрального состава анализируемого сигнала в каждый момент времени.

В разделе 1.3 рассмотрены методы вычисления оптических потоков. На сегодняшний момент, в литературе получил широкое распространение термин "оптический поток" ("optical flow"). Кажущееся движение яркостной картинки, наблюдаемое при движении объектов перед камерой или движение камеры в неподвижной окружающей обстановке, называется оптическим потоком. Поскольку нам доступен только оптический поток, и мы будем исходить из предположения, что в обычном случае оптический поток не сильно отличается от поля движения. Это позволяет нам оценивать относительное движение, исходя из изменения изображения во времени. Классифицируя подходы оценки оптических потоков, можно выделить основные группы: дифференциальный подход; корреляционный подход, основанный на сравнении областей изображений; частотные методы.

В дифференциальном подходе скорость рассчитывается путем пространственно-временного дифференцирования интенсивности изображения или изображения обработанного низкочастотным или полосовым фильтром. Допустим, что $I(x, t)$ функция интенсивности изображения, которая возвращает значение интенсивности в градациях серого для пиксела с местоположением x на изображении со временем t . Градиентные методы, которые относятся к дифференциальным, основаны на допущении сохранения интенсивности

$$I(x, t) = I(x + \delta x, t + \delta t), \quad (3)$$

которое может быть разложено в ряд Тейлора с отбрасыванием составляющих высокого порядка.

Корреляционные подходы описывают смещение (которое является аппроксимацией скорости) как сдвиг, который позволяет достичь максимального соответствия между близко расположенными областями изображения, которые могут меняться во времени. Примем, что небольшие локальные искажения, связанные со сдвигом угла наблюдения, игнорируются. Сравнение областей изображения обычно достигается максимизацией критерия подобия. В частности, коэффициент корреляции между двумя функциями f и g может быть описан как интеграл их произведения:

$$\int_D f(x + \delta x)g(x)dx. \quad (4)$$

Поиск смещения между f и g осуществляется через поиск δx , при котором значение интеграла достигает максимума, в идеале будет выполняться условие:

$$f(x + \delta x) = g(x). \quad (5)$$

Частотные методы работают с пространственно ориентированной энергией в Фурье пространстве, поэтому позволяют оценивать смещение сигнала там, где алгоритмы, основанные на сравнении, не дают правильный результат.

Фурье преобразование смещенного двухмерного сигнала интенсивности определенного в (3):

$$\hat{I}(k, \omega) = \hat{I}_0(k)\delta(v^T k + \omega), \quad (6)$$

где $\hat{I}_0(k)$ – Фурье трансформанта $I(x, 0)$ и x означает пространственное положение, δ – дельта-функция Дирака, k, ω – означает пространственно-временную частоту.

Были сформулированы цель и задачи исследования, в процессе решения которых необходимо было разработать алгоритм оценки перемещений, обладающий субпиксельной точностью и включающий постобработку. Необходимо было провести оптимизацию алгоритма по вычислительным затратам, разработать методику верификации алгоритмов оценки деформаций поверхностей материалов.

Вторая глава посвящена способу моделирования оптических изображений отражающих различные схемы нагружения образцов пластичных материалов. Проведено моделирование помех содержащихся в изображениях, получаемых с помощью видеодатчиков.

Изображение реальной поверхности представляет собой оптический образ, каждый участок которого характеризуется определенной яркостью (интенсивностью отраженного света). При дальнейшем описании моделирования изображений под термином "поверхность" будем понимать непрерывное распределение яркости (оптический образ). Построение модельных изображений можно разбить на несколько этапов:

- Получение набора дискретных отсчетов яркости (узловых точек) "поверхности" с заданным распределением;
- Построение непрерывного распределения яркости ("поверхности") путем интерполирования полученных узловых точек;
- Задание параметров (типа и приращения) деформации и перерасчет "поверхности" с учетом заданных значений;
- Дискретизация "поверхности" с целью получения модельного изображения.

Моделирование оптического образа поверхности описано в разделе 2.1. Оптический образ поверхности рассматривался как случайный процесс без выраженных характерных объектов, т.е. представляющий собой фон. Наиболее простым и эффективным способом моделирования изображений фона как двумерных стохастических полей с заданными статистическими свойствами является соотношение вида:

$$F_{x,y} = \alpha F_{x,y-1} + \beta F_{x-1,y} - \alpha\beta F_{x-1,y-1} + n_{x,y} \sigma \sqrt{(1-\alpha)(1-\beta)} + m(1-\alpha)(1-\beta), \quad (7)$$

где $F_{x,y}$ – текущее значение фона в точке x, y ; α, β – коэффициенты корреляции между соседними элементами по горизонтали и вертикали; $n_{x,y}$ – случайная последовательность чисел с нулевым средним и единичной дисперсией; σ – требуемая величина среднеквадратичного отклонения амплитуд яркости изображения; m – требуемая величина математического ожидания амплитуд яркости изображения.

После расчета двумерного набора узлов с заданными статистическими параметрами проводили интерполяцию узлов для получения непрерывного распределения яркости. Расстояние между узлами принимается равным одному пикселу. Таким образом, вся модель разбивается на квадратные участки; интерполирование производится бикубическими двумерными сплайнами вида:

$$f(x, y) = a_0x^3 + a_1x^2 + a_2x + a_3y^3 + a_4y^2 + a_5y + a_6x^3y^3 + a_7x^3y^2 + a_8x^3y + a_9x^2y^3 + a_{10}xy^3 + a_{11}x^2y^2 + a_{12}x^2y + a_{13}xy^2 + a_{14}. \quad (8)$$

В результате деформации изменяется положение каждой точки поверхности. На рис. 1 приведено два типа деформации: сдвиг (рис. 1, а) и двусное растяжение (рис. 1, б), сплошными линиями показана форма объекта до деформации, а пунктирными – после деформации. Моделирование изображений, отражающих различные схемы нагружения образцов пластичных материалов описано в разделе 2.2.

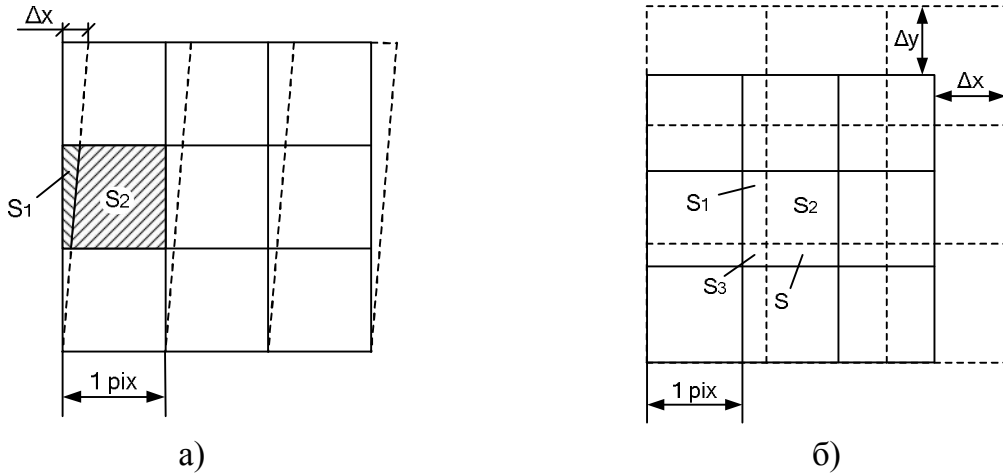


Рис. 1. К пояснению способа задания деформации модельной поверхности
а) чистый сдвиг; б) двусное растяжение

Дискретизация "поверхности" подразумевает нахождение яркости каждого пиксела изображения после деформации. Яркость каждого пиксела определяется как среднее значение яркости участка "поверхности", который соответствует положению и размеру пиксела. Среднее значение яркости участка "поверхности" можно найти как $f_{avg} = V/S$, где V – объем тела, основанием которого служит область S

плоскости x, y и которое сверху ограничено поверхностью $z = f(x, y)$, область S соответствует одному пикселу, $f(x, y)$ – непрерывное распределение яркости.

Объем тела можно найти путем интегрирования поверхности по области S , при $S = \{(x, y) \mid x_1 \leq x \leq x_2, y_1(x) \leq y \leq y_2(x)\}$

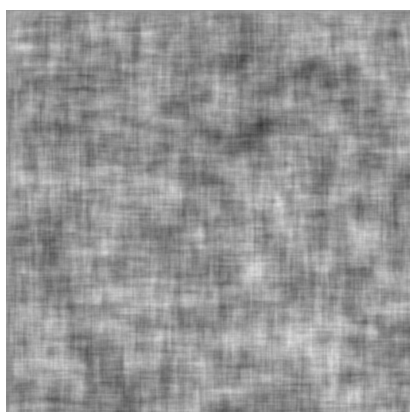
$$V = \iint_{(S)} f(x, y) dx dy = \int_{x_1}^{x_2} \left(\int_{y_1(x)}^{y_2(x)} f(x, y) dy \right) dx, \quad (9)$$

при $S = \{(x, y) \mid x_1(y) \leq x \leq x_2(y), y_1 \leq y \leq y_2\}$

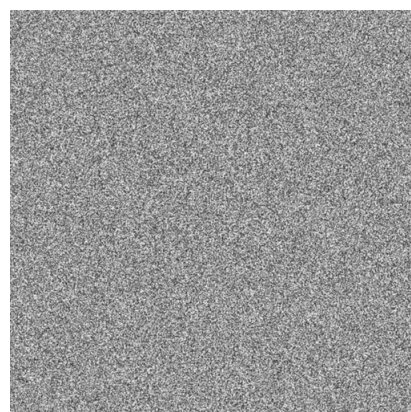
$$V = \iint_{(S)} f(x, y) dx dy = \int_{y_1}^{y_2} \left(\int_{x_1(y)}^{x_2(y)} f(x, y) dx \right) dy. \quad (10)$$

Поскольку искомая область соответствует одному пикселу, то $f_{\text{avg}} = V/1 = V$. После приращения деформации узловые точки смещаются, в результате в область пиксела может попадать несколько сплайнов "поверхности" (рис. 1), поэтому среднее значение будет равно сумме объемов, например для пиксела, показанного на рис. 1, $a f_{\text{avg}} = V_1 + V_2$, V_1 и V_2 соответствуют областям S_1 и S_2 .

На рис. 2 показаны примеры изображений поверхности, полученных с помощью статистической модели (рис. 2, а) и модели типа равномерного распределения (рис. 2, б).



а)



б)

Рис. 2. Пример модельных изображений поверхности, полученных с помощью статистической модели (а) и модели типа равномерного распределения (б)

В разделе 2.3 описано моделирование помех, содержащихся в изображениях, получаемых с помощью видео датчиков. Оптическая система может вносить дополнительные искажения в сигнал (изображение). Следствием неточно юстированной оптической системы (либо при ее расфокусировке) будет размытие изображения, которое в работе моделировалось с использованием следующего выражения:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{1}{2} \frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}}, \quad (11)$$

где $h(x, y)$ – функция рассеяния точки (импульсная переходная характеристика), σ – радиус размытия.

В фотодетекторе с достаточным внутренним усилением, таком, как фотоэлектронный умножитель, дробовый шум обычно преобладает над тепловыми шумами любого происхождения, возникающими в последующих цепях; в фотодетекторах

другого типа, как правило, преобладает тепловой шум и фототок можно считать постоянной величиной. В любом случае, однако, при большом числе испускаемых фотоэлектронов распределение Пуассона можно аппроксимировать гауссовым распределением, вида

$$p(i_p) = \left[\frac{2\pi q^2 u_s}{\tau^2} \right]^{-1/2} \exp \left\{ \frac{-(i_p - qu_s / \tau)^2}{2q^2 u_s / \tau^2} \right\}, \quad (12)$$

где q – заряд электрона (равный $1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл), u_s – среднее число электронов, испускаемых фотодетектором при его освещении, i_p – ток фотодетектора, протекающий через фильтр, τ – время наблюдения.

В третьей главе приведено описание разработанного способа оценки деформации включающего алгоритм определения перемещений. Описан алгоритм, позволяющий снизить вычислительные затраты при вычислении взаимно корреляционной функции, основанный на циклической буферизации и быстром преобразовании Фурье. Описан алгоритм субпиксельного определения перемещений. Описаны разработанные методика и алгоритмы постобработки полей векторов перемещений (ПВП).

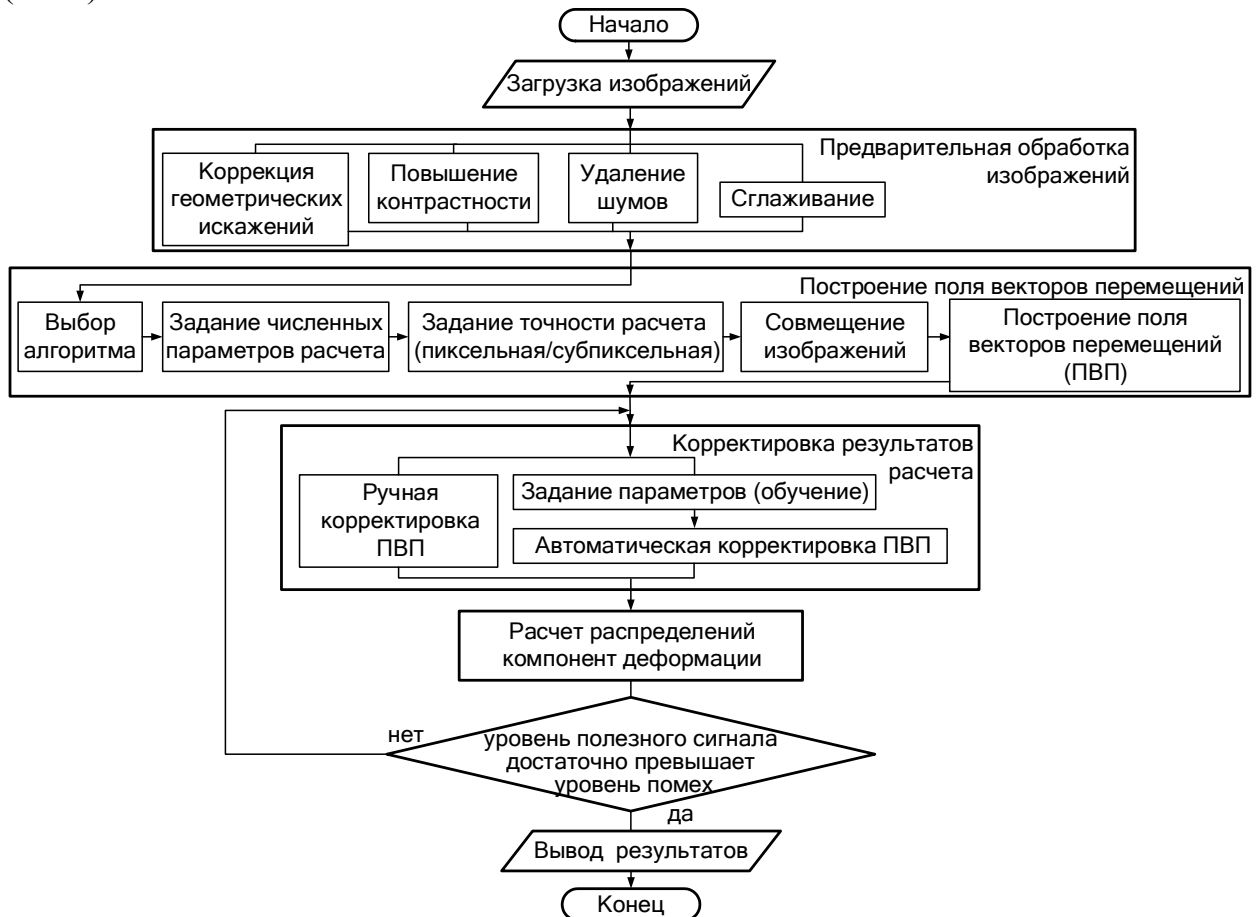


Рис. 3. Схема алгоритма работы оптико-телевизионной измерительной системы

В общем виде схема работы оптико-телевизионной измерительной системы (ОТИС) может быть представлена в виде, показанном на рис. 3. Не останавливаясь подробно на вопросе калибровки оптической системы, отметим, что конечный результат работы ОТИС – картина распределения деформации зависит от качества обработки информации на этапах: 1) формирования изображения; 2) его предварительной обработки; 3) расчета информативных признаков; 4) постобработки резуль-

татов расчета (фильтрации), а также участия оператора в настройке параметров расчета и ручной корректировке промежуточных данных.

Алгоритмы определения смещений основаны на использовании процедуры установления соответствия между участками двух изображений путем вычисления оценки следующего вида:

$$\hat{v} = \arg \underset{v}{extr} J(F_1, F_2(v)), \quad (13)$$

где v – геометрические параметры, имеющие смысл сдвигов по декартовым координатам, по углу, масштабу и т.п., F_1 – текущее изображение (ТИ), $F_2(v)$ – эталонное изображение (ЭИ), полученное до деформации или в определенный момент времени, J – мера близости ТИ и ЭИ.

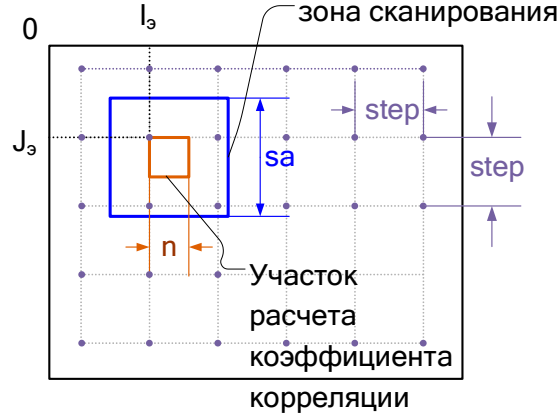


Рис. 4. К пояснению принципа действия алгоритма

Если для вычисления ВКФ используются коэффициенты корреляции, то в качестве экстремума берется максимум, если используются коэффициенты разности то минимум. Ниже приведены основные выражения для вычисления коэффициентов разности:

$$k_{SSD} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - I_{2,i,j})^2, \quad k_{ZSSD} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - \bar{i}_1 - I_{2,i,j} + \bar{i}_2)^2, \quad (14)$$

где I_1, I_2 – яркости элементов (пикселей) сравниваемых участков изображений, $\bar{i}_1, \bar{i}_2$ – среднеарифметические значения элементов тех же участков, n – размер стороны элементарной площадки, для которой вычисляется коэффициент. Аббревиатуры в коэффициентах означают: SSD (Sum of squared differences) – сумма квадратов разностей, ZSSD (Zero-mean sum of squared differences) – сумма квадратов разностей с нулевым средним.

Для вычисления коэффициента корреляции ZNCC (Zero-mean normalized cross-correlation) – нормированная кросс-корреляция нулевым средним, используется следующее выражение:

$$k_{ZNCC} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - \bar{i}_1) \cdot (I_{2,i,j} - \bar{i}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{1,i,j} - \bar{i}_1)^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (I_{2,i,j} - \bar{i}_2)^2}} \quad (15)$$

Нахождение максимума коэффициента в пределах зоны сканирования производится построчно с шагом 1 пиксел. Размер зоны сканирования (sa), шаг построе-

ния векторов (step) и размер участка расчета коэффициента корреляции (разности) n задаются оператором (рис. 4).

Применение теоремы о свертке позволяет вычислить циклическую свертку y_l двух последовательностей h_n и x_m , используя дискретное преобразование Фурье (ДПФ), по схеме

$$y_l = \text{ДПФ}^{-1} \{ [\text{ДПФ}(h_n)] [\text{ДПФ}(x_m)] \}, \quad (16)$$

где

$$y_l = \sum_{m=0}^{N-1} h_m x_{l-m}, \quad l = 0, \dots, N-1. \quad (17)$$

Поскольку ДПФ можно вычислять с помощью БПФ-алгоритмов, то этот метод требует, чтобы число операций было пропорционально $M \log N$ и, следовательно, меньше числа операций при прямом вычислении.

Конечным результатом работы алгоритма являются рассчитанные компоненты деформации. Компоненты рассчитываются путем численного дифференцирования полученного поля перемещений. Запишем выражения для продольной ε_{xx} , поперечной ε_{yy} , сдвиговой ε_{xy} и поворотной ω_z компонент тензора дисторсии:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{dU_x}{dx}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{dU_y}{dy}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{dU_x}{dy} + \frac{dU_y}{dx} \right), \quad \omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{dU_y}{dx} - \frac{dU_x}{dy} \right), \quad (18)$$

где dU_x, dU_y – приращение смещений элементарных площадок по соответствующим осям.

Также запишем выражение для интенсивности деформации сдвига γ_i

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + \varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \frac{3}{2} \varepsilon_{xy}^2}. \quad (19)$$

Безразностная формула численного дифференцирования имеет вид:

$$\dot{y}(x_k) = \sum_{i=0}^n (-1)^{n+i} \frac{C_n^i y_i}{n!} \frac{d}{dt} \left[\frac{t(t-1)\dots(t-n)}{t-i} \right]_{t=k}, \quad (20)$$

где k – номер отсчета функции, n – величина, определяющая уровень приближения.

В выражении (20) для сокращения записи был введен символ

$$C_t^m = \frac{t(t-1)\dots(t-m+1)}{m!}, \quad (21)$$

где m – натуральное число и t – произвольное действительное число.

В данной работе был использован алгоритм расчета с субпиксельной точностью, основанный на интерполировании корреляционной функции. Субпиксельная точность достигается бикубическим (двумерным) интерполированием узлов с наибольшими значениями коэффициентов, т.е. интерполируется не все распределение корреляционной функции в расчетной области, а только один участок.

После интерполирования находится максимум полученного сплайна $f(x, y)$, который определяет смещение участка. Экстремум интерполяционного сплайна находится итеративно через вычисление градиентов (рис. 5). На схеме алгоритма поиска экстремума сплайна (рис. 5), количество итераций, которые определяют точность нахождения максимума и соответственно точность алгоритма обозначено как n .

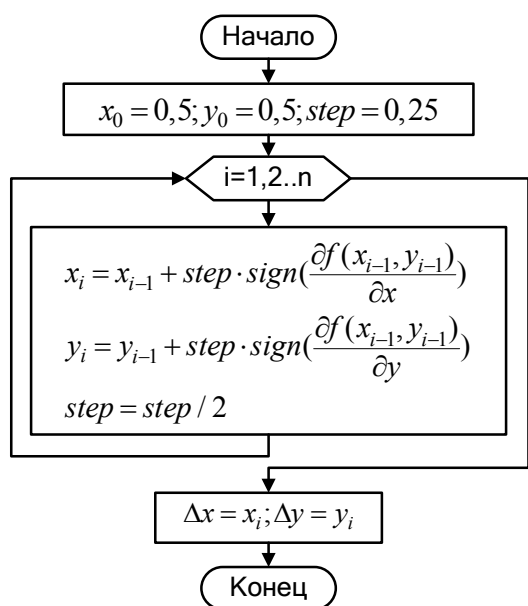


Рис. 5. Схема алгоритма нахождения экстремума интерполяционного сплайна

зрения ее физической интерпретации, поскольку позволяет исключить из рассмотрения ряд "ложных" максимумов, которые не являются областями локализации деформации. При расчете ПВП применялся корреляционный алгоритм ZNCC. Размер изображений был равен 768×576 пикселей, шаг построения векторов 16 пикселей и размер области для расчета коэффициентов корреляции 32 пиксела.

Расчет полей векторов перемещений с пиксельной точностью при деформациях, которые отражаются на изображении в смещениях величиной 1-2 пиксела, приводит к резким переходам между векторами. При субпиксельном расчете ПВП переходы сглаживаются. На рис. 6 приведены распределение поворотной компоненты тензора дисторсии рассчитанное из ПВП, имеющего пиксельную точность (рис. 6, а) и субпиксельную точность соответственно (рис. 6, б). Результаты, представленные на рис. 6 свидетельствуют, о том, что субпиксельная точность расчета перемещений позволяет получить более корректную картину распределения деформации, с точки

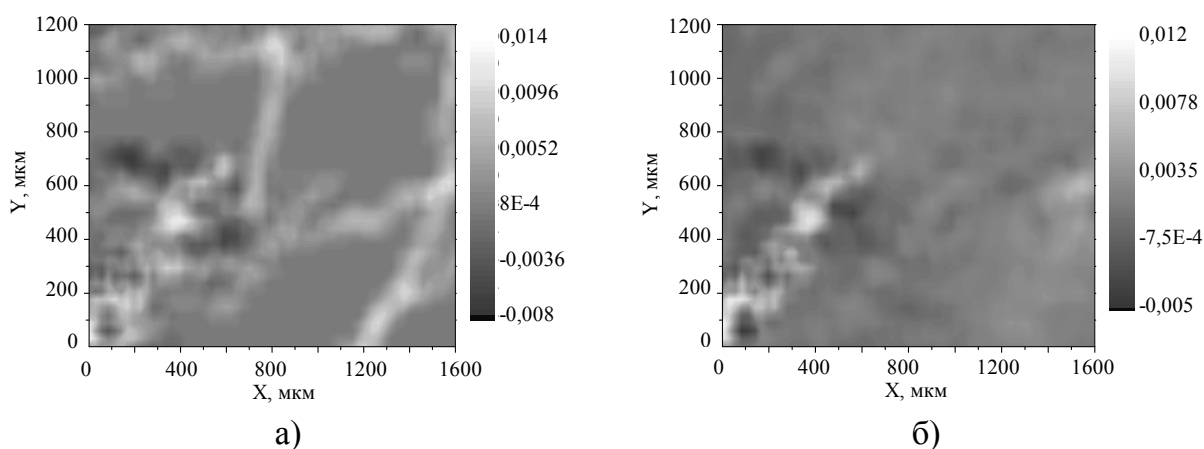


Рис. 6. Поворотная компонента ω_z

Постобработка полей векторов перемещений в общем виде включает следующие действия:

1. Определение некорректных векторов по отклонению направления и длины от векторов, лежащих в окрестности.
2. Определение трещин (разрывов материала), приводящих к разрыву полей векторов перемещений. Нахождение векторов попадающих в трещины.
3. Ручная корректировка векторов по длине и направлению. Обозначение векторов как некорректных для дальнейшей обработки.
4. Корректировка векторов поля. Производится путем интерполирования векторов справа и слева (сверху и снизу) от трещины (в зависимости от ориентации трещины на изображении).

5. Сглаживание поля векторов перемещений. Новый вектор рассчитывается как среднеарифметическое векторов попадающих в указанную окрестность изображения.

В четвертой главе приводятся результаты тестирования и верификации разработанного способа оценки деформаций. Традиционно при диагностике усталостных трещин анализируется параметр раскрытия трещины δ . В работе было предложено рассчитывать интенсивность деформации сдвига γ , поэтому было проведено сравнение γ и δ .

Для расчета параметра раскрытия трещины δ используются только те вектора, которые находятся вблизи края трещины на поверхности материала и не попадают в область, соответствующую трещине (рис. 7). Запишем вектора $\vec{r}_{1,1}, \vec{r}_{1,2}$:

$$\vec{r}_{1,1} = \{\Delta x_{1,1}, \Delta y_{1,1}\}; \vec{r}_{1,2} = \{\Delta x_{1,2}, \Delta y_{1,2}\}.$$

Координаты точек начала векторов отличаются только по y , таким образом раскрытие трещины по координатам x_1 и x_i можно записать в виде:

$$\delta_1 = \Delta x_{1,1} - \Delta x_{1,2}; \delta_i = \Delta x_{i,1} - \Delta x_{i,2}.$$

Таким образом, среднеарифметическое раскрытие трещины можно записать в виде:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_{i,1} - \Delta x_{i,2})}{n}. \quad (22)$$

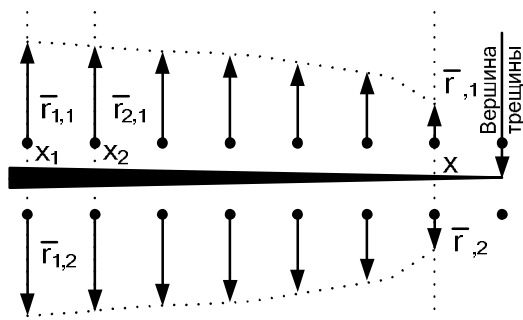


Рис. 7. К пояснению методики расчета раскрытия трещины δ

В эксперименте исследовались зависимости параметра интенсивности деформации сдвига γ_{avg} (среднеарифметическое значение) от положения и размера анализируемой области расчета γ относительно трещины. Расчет γ проводился по всему полю векторов перемещений, и по области, ограниченной расчетным окном (рис. 8, а). Расчеты показали, что величина и характер изменения γ зависят от размера расчетного окна (рис. 8, б).

При сопоставлении характера изменения параметров γ_{avg} и δ видно, что при минимальном размере расчетного окна перед вершиной трещины 50×100 векторов зависимость γ_{avg} от δ является почти линейной (кривая 3). Увеличение размеров расчетного окна до полного поля приводит к отклонению отношения γ_{avg} от δ от линейного вида (кривые 2 и 1, соответственно).

В пятой главе проводится разработка способов диагностики применительно к высоконагруженным агрегатам планера самолетов типа СУ-27, а также аттестации механических свойств керамических материалов.

В рамках работ, проводимых по договору "Разработка оптического метода встроенного контроля высоконагруженных агрегатов планера" между ИФПМ СО РАН и ОАО «ОКБ Сухого» было предложено использовать в качестве чувствительных элементов при диагностировании состояния элементов конструкции планера датчики-фольги. Датчики устанавливаются в определенных узлах конструкции планера. Состояние поверхности датчика фиксируется с помощью видеодатчика.

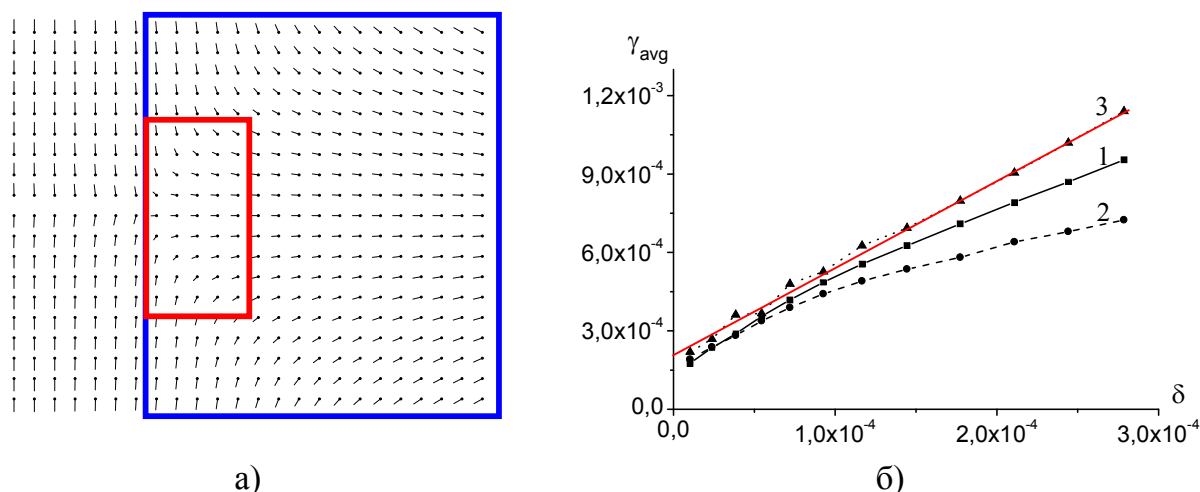


Рис. 8. Поле векторов перемещений с областями, в которых рассчитывалась γ_{avg} (а) и зависимость γ_{avg} от δ (б)

Обозначения кривых: 1) γ при размере окна равном всему распределению; 2) γ при размере окна за вершиной трещины 180×200 векторов; 3) γ при размере окна за вершиной трещины 50×100 векторов.

Процесс диагностирования в общем виде можно разбить на четыре этапа (рис. 9):

- 1) Сбор данных;
- 2) Обработка данных;
- 3) Принятие решения о продолжении эксплуатации планера;
- 4) Получение тарифовочных данных.

К этапу сбора данных относится процесс регистрации изображений с использованием видеодатчика (обычно цифровая фотокамера). Поскольку метод обработки изображений основан на расчете полей векторов перемещений, этап сбора данных включает формирование начального изображения поверхности датчика-фольги (до деформации) и формирование текущего изображения поверхности датчика в процессе диагностирования. Изображение недеформированной поверхности датчика фиксируется перед началом эксплуатации летательного аппарата.

Этап обработки данных включает в себя обработку изображений, с использованием способа оценки деформации, а также операции с базой данных. Обработка данных является основным этапом способа диагностики, от которого зависит принятие решения на этапе 3. Обработку изображений можно разбить на три этапа: построение полей векторов перемещений, постобработки в случае больших степеней деформации поверхности датчика-фольги и появления некорректных векторов и расчет среднеарифметического значения интенсивности деформации сдвига. Минимальная постобработка необходима для исключения влияния таких векторов. База данных представляет собой организованную структуру, состоящую из набора директорий файловой системы и файлов.

Степень дефектности отдельно взятого элемента конструкции планера, на котором закреплен датчик, определяется сравнением вычисленного текущего значения величины среднеарифметической интенсивности деформации сдвига γ_{avg} с критической величиной $\gamma_{крит}$, которое считывается из базы данных. Решение о дальнейшей эксплуатации планера принимается, если γ_{avg} меньше $\gamma_{крит}$, в противном случае эксплуатация приостанавливается до устранения неполадки или принятия иного решения. Критическое значение интенсивности деформации сдвига $\gamma_{крит}$ на-

ходится индивидуально для каждого конструкционного материала на этапе получения тарировочных данных и заносится в базу данных. Этап получения тарировочных данных проводится в лабораторных условиях один раз и в дальнейшем при эксплуатации планера не выполняется, в отличие от многократного процесса диагностирования элементов конструкции планера. Для установления критического значения интенсивности деформации сдвига $\gamma_{\text{крит}}$ необходимо было провести ряд экспериментов с конструкционным материалом. Одновременно с определением $\gamma_{\text{крит}}$ проводилась отработка алгоритмов оценки деформации, которые составляют основу способа диагностики.

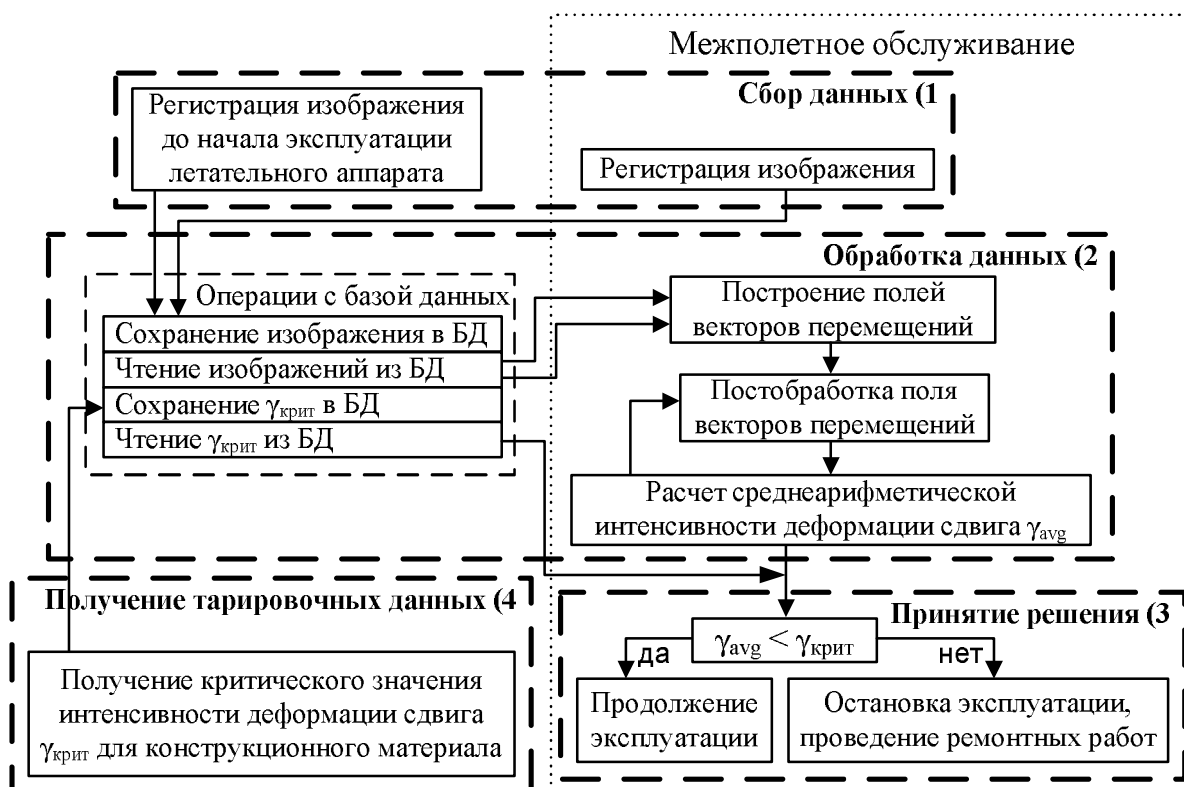


Рис. 9. Схема способа диагностирования усталостного разрушения авиационных материалов

Второй прикладной проблемой, решаемой в главе, была разработка способа аттестации механических свойств керамических материалов из диоксида циркония, основанного на расчете диаграммы σ - γ при проведении испытаний тестовых керамических образцов на сжатие (рис. 10). В настоящее время в современном материаловедении преобладает концепция разработки новых материалов, подразумевающая получение материалов с заранее заданными свойствами. При этом, свойства материала определяются, прежде всего, его внутренней структурой. Традиционно механические свойства керамических образцов определяются с использованием диаграммы нагружения σ - ϵ . Такой подход не позволяет в явном виде учесть внутреннюю структуру материала (керамических образцов), т.к. одна и та же диаграмма может соответствовать образцам, имеющим различную структуру. В связи с этим был предложен другой подход к характеристике механических свойств образцов конструкционной керамики.

Этап сбора данных включает изготовление образца материала, установку системы регистрации изображений и непосредственно съемку поверхности керамиче-

ского образца в процессе его сжатия в испытательной машине. Одновременно со сжатием образца регистрируется диаграмма нагружения σ - ϵ . Установка системы регистрации изображений (видеодатчик) включает настройку углов наклона камеры, освещения поверхности, позиционирования камеры с учетом ее возможных разворотов относительно плоскости образца.

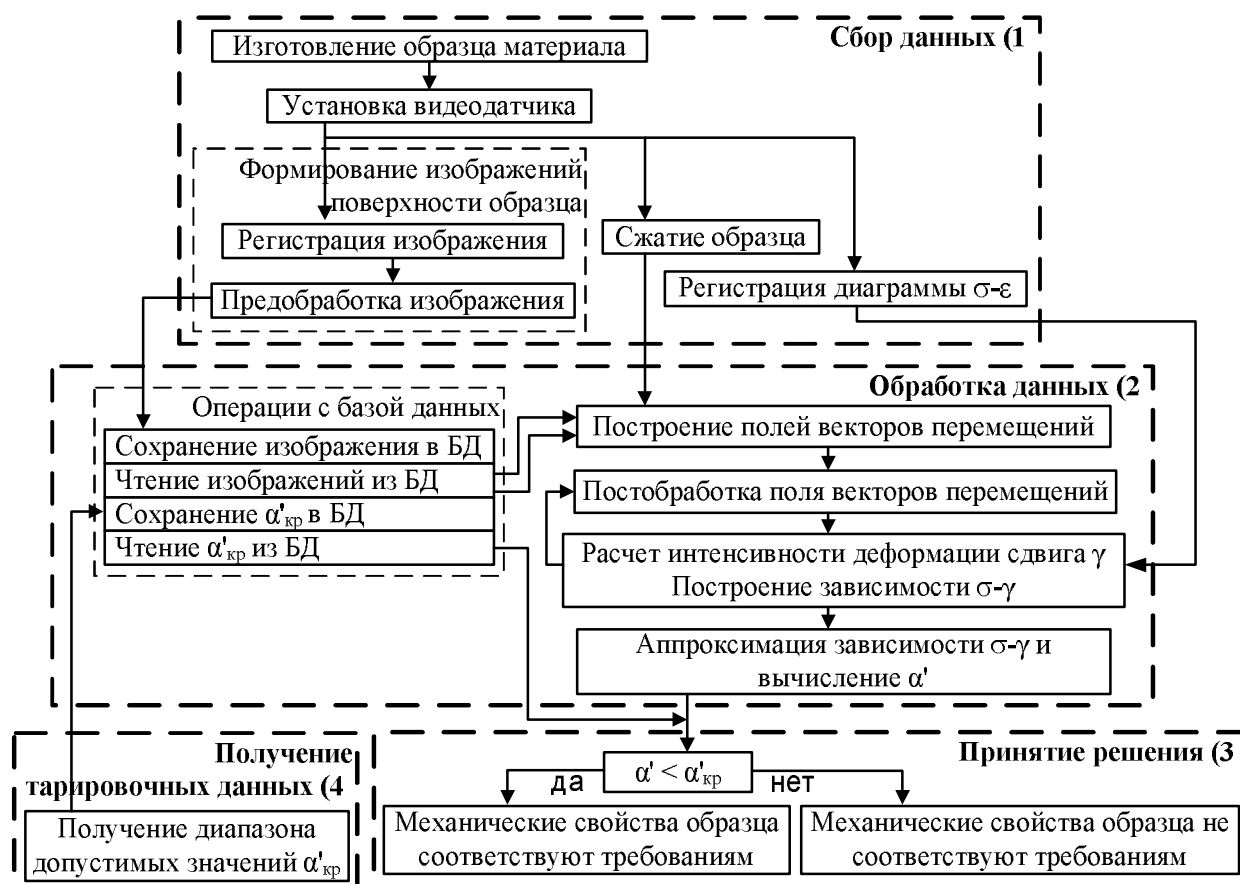


Рис. 10. Схема способа аттестации механических свойств керамических материалов

Обработка данных включает операции с базой данных и обработку изображений. Обработка изображений основана на методе построения полей векторов перемещений и расчете деформации. Для уменьшения влияния помех на изображениях в виде трещин на результат диагностирования необходима постобработка полей векторов перемещений. При анализе серии изображений, полученных в процессе нагружения, вычисляется зависимость интенсивности деформации сдвига γ от приращения деформации ϵ . Аттестация механических свойств проводится путем построения диаграммы зависимости значения внешнего деформирующего напряжения σ от интенсивности деформации сдвига γ . На рис. 11 приведены такие диаграммы, полученные для керамических образцов с крупными и мелкими порами. Для автоматизации процесса аттестации зависимость σ - γ аппроксимируется и вычисляется скорость изменения аппроксимирующих прямых α' .

На этапе принятия решения сравниваются скорости изменения наклона зависимости σ - γ (обозначенное как α') и пороговое значение $\alpha'_{кр}$ считанное из базы данных. Если α' меньше $\alpha'_{кр}$, что имеет место на диаграмме, приведенной на рис. 11, а, то механические свойства образца соответствуют требуемым; в противном случае образец отбраковывается (рис. 11, б). Получение тарифовочных данных проводится

один раз для установления критического значения скорости изменения зависимости σ - γ .

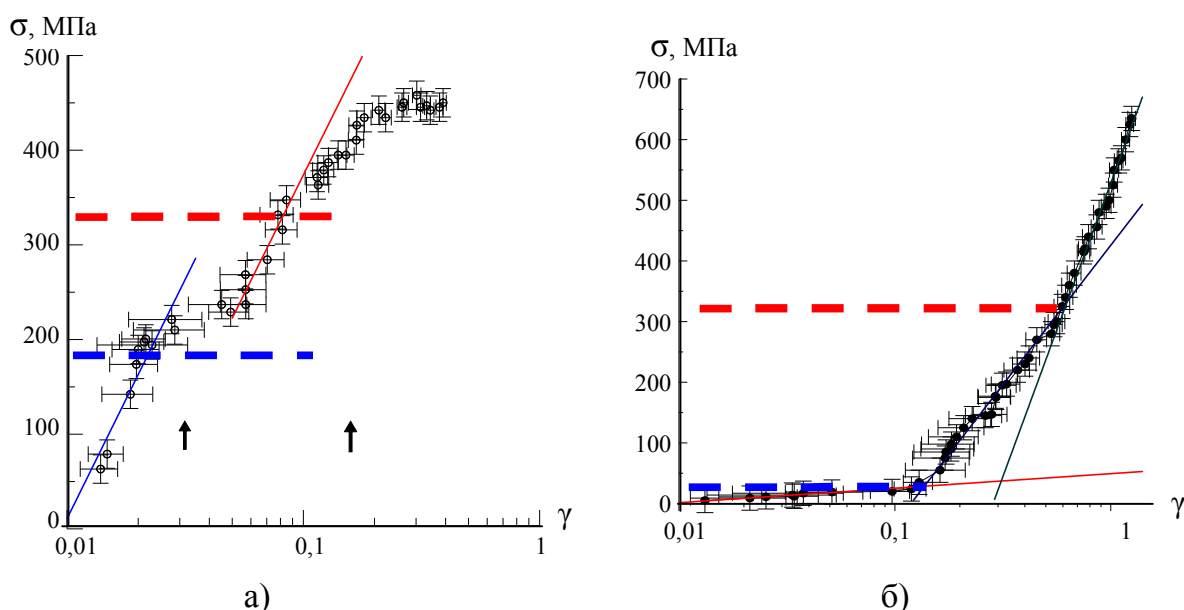


Рис. 11. Зависимость среднего напряжения от интенсивности деформации сдвига для образцов типа 1 (а) и типа 2 (б). Стрелками указаны моменты разрушения

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертационная работа посвящена актуальной проблеме – разработке и повышению быстродействия, помехоустойчивости и точности алгоритмов анализа изображений, основанных на построении полей векторов перемещений и последующем расчете на их основе компонент деформации.

В результате выполнения диссертационной работы получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Разработан алгоритм работы оптико-телевизионной измерительной системы, основанный на построении векторов перемещений и последующем вычислении деформации, позволяющий выявлять и количественно характеризовать области локализации деформации путем расчета интенсивности деформации сдвига.

2. Предложен алгоритм субпиксельного определения перемещения участков изображения поверхности, применение которого позволяет существенно повысить точность определения деформации и обеспечить физическую корректность результатов расчета.

3. Предложена методика постобработки полей векторов перемещений, позволяющая существенно уменьшить ошибки вычисления деформаций, вызванные разрывами функции перемещений, эффективность применения которой подтверждается результатами исследований серий модельных и экспериментальных изображений.

4. Предложена и экспериментально исследована методика верификации алгоритма расчета деформации с использованием модельных изображений, отражающих формоизменение поверхности материалов при различных схемах деформирования. Показано качественное и количественное соответствие результатов аналитического расчета и данных экспериментального определения деформации.

5. В рамках договора с ОАО «ОКБ Сухого» "Разработка оптического метода встроенного контроля высоконагруженных агрегатов планера" разработан способ

диагностики усталостного разрушения авиационных материалов и элементов конструкций, основанный на предложенных алгоритмах расчета деформации. Разработан способ аттестации механических свойств конструкционной керамики, основанный на построении зависимости среднего значения интенсивности деформации сдвига как функции приложенного напряжения σ - γ и анализе изменения угла наклона аппроксимирующих прямых.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Любутин П.С., Панин С.В., Сапожников С.В., Сырямкин В.И. Программа построения векторов смещений и оценки деформаций поверхностей твердых тел. Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2004612276. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 06.10.2004.

2. Панин С.В., Сырямкин В.И., Любутин П.С. Оценка деформации твердых тел по изображениям поверхности // Автометрия – 2005. – Т.41. – №2. – С. 44-58.

3. Панин С.В., Любутин П.С. Верификация метода оценки деформации на мезоуровне, основанного на построении полей векторов перемещений участков поверхности // Физическая мезомеханика – 2005. – Т.8. – №2. – С. 69-80.

4. Любутин П. С., Панин С. В. Исследование точности и помехоустойчивости построения векторов перемещений при оценке деформаций оптико-телевизионным методом // Вычислительные технологии – 2006. – Т.11. – №2. – С. 52-66.

5. Любутин П. С., Панин С. В. Измерение деформации на мезоуровне путем анализа оптических изображений поверхности нагруженных твердых тел // Прикладная математика и техническая физика, 2006, Т.47, №6, с.158-164.

6. С.Н. Кульков, С.П. Буякова, С.В. Панин, П.С. Любутин. Формирование поверхностных структур при деформации пористых непластичных сред. Физическая мезомеханика. 2006. –Т. 9. Специальный выпуск. С. 83-86.

7. Панин С.В., Любутин П.С., Буякова С.П. и Кульков С.Н. Исследование поведения при нагружении пористых керамик путем расчета мезоскопических деформационных характеристик. Физическая мезомеханика, 2008, Т. 11, №6. с. 77-86.

8. С.В. Панин, Ю.П. Стефанов, П.С. Любутин. Оценка деформаций на мезоуровне при распространении усталостной трещины на основе количественной обработки полей векторов перемещений с помощью оптико-телевизионной системы // Физическая мезомеханика. 2009. –Т. 12. №3. С. 45-53.

В сборниках трудов и тезисов конференций

9. Любутин П. С., Панин С. В. Метод оценки деформации твердых тел, основанный на построении полей векторов перемещений, Конференция-конкурс работ студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии Microsoft в информатике и программировании», Новосибирск, 22 – 24 февраля 2005 г. с. 131-133.

10. Любутин П.С., Панин С.В. Оценка точности и помехоустойчивости метода построения полей векторов перемещений, XI Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 28 марта - 1 апреля 2005 г.

11. Любутин П. С., Панин С. В. Метод построения полей векторов перемещений с субпиксельной точностью, Третья всероссийская конференция молодых ученых "Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-м тысячелетии", Томск, 3–6 марта 2006 г. С. 657-660.