

На правах рукописи



**Солодушкин Андрей Иванович**

**ФОРМИРОВАНИЕ ЕДИНОГО ПОЛЯ СМЕЩЕНИЙ  
ПО ОПТИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ПОВЕРХНОСТИ  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент  
**Плешанов Василий Сергеевич**

Официальные оппоненты:

**Евтушенко Геннадий Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Национальный  
исследовательский Томский  
политехнический университет»,  
заведующий кафедрой «Промышленной  
и медицинской электроники»

**Светлаков Анатолий Антонович**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Электронных средств  
автоматизации и управления»  
ФГБОУ ВПО «Томский  
государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Московский  
государственный технический  
университет радиотехники, электроники  
и автоматики»

Защита диссертации состоится «5» ноября 2013 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «    »                      2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.269.09 к.т.н., доцент



Васендина Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из задач экспериментальной механики и диагностики является измерение деформаций нагруженных элементов машин и конструкций. Изучение процессов деформации, развивающихся в конструкционных материалах, позволяет лучше понять механизмы развития разрушения, выработать рекомендации по оптимизации их механических свойств путем термической обработки, упрочнения поверхности и др., а также оценивать их текущее механическое состояние. Проведение таких исследований требует создания новых аппаратных и программных средств, являющихся частью автоматизированных измерительных комплексов, способных оперативно выполнять обработку больших объемов информации, производить высокоточные измерения, качественно и наглядно представлять полученные результаты.

Деформация материала под действием внешних механических воздействий представляет собой его реакцию, которая в механике деформируемого твердого тела характеризуется пространственными производными поля векторов смещений. Процессы деформации и разрушения описываются в терминах поля смещений, тензора напряжений и тензора деформаций. На практике необходимо измерять поля смещений и деформацию с высокой точностью и, желательно, в масштабе исследуемого объекта.

С развитием современной техники появилась реальная возможность получать качественные изображения поверхности нагруженного материала в цифровой форме. Когда амплитуда смещений становится соизмеримой с длиной световой волны видимого диапазона, принципиальную возможность измерить эти смещения с приемлемой точностью и значительной разрешающей способностью дает метод оптического потока. Он характеризуется сравнительно низкой погрешностью измерений, практичностью и удобством применения.

Одним из вариантов данного метода является метод корреляции цифровых изображений (КЦИ). Данный метод требует значительных вычислительных затрат при обработке больших массивов данных, что связано с высоким временем расчета функционала и значительным количеством вариантов перебора при нахождении искоемых координат вектора смещения. Помимо этого, с ростом оптического увеличения возрастает чувствительность и точность метода КЦИ. При этом уменьшается поле зрения микроскопа, которое может стать меньше размеров области, охваченной деформацией. Увеличение площади съемки связано в этом случае со значительным возрастанием количества кадров поверхности материала.

Таким образом, задачи разработки эффективных алгоритмов анализа оптических изображений для расчета единого поля векторов смещений и деформации и создания на их основе измерительного комплекса для контроля механического состояния материала представляют большую сложность и, в условиях возрастающего количества данных и повышения требований к скорости их обработки и анализа, остаются актуальными.

**Целью работы** является разработка алгоритмов и программных средств расчета единого поля векторов смещений и деформации материала для контроля его механического состояния в масштабе исследуемого объекта.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

1. Разработать алгоритмы формирования панорамы и единого поля векторов смещений по совокупности изображений или векторных полей соответственно.
2. Оптимизировать алгоритм построения поля векторов смещений по вычислительным затратам.
3. Оценить точность и повысить помехоустойчивость алгоритмов создания панорамы и формирования единого поля векторов смещений.
4. Разработать программные средства для комплекса «FieldMetter», предназначенного для измерения и анализа полей смещений и деформации материала в масштабе исследуемого объекта.
5. Апробировать разработанные программные средства на примерах исследования механизмов деформации и разрушения сварных соединений конструкционной стали.

**Научную новизну** диссертационной работы определяют:

1. Алгоритм формирования единого векторного поля, основанный на сшивке перекрывающихся векторных полей путем их согласования по постоянной составляющей.
2. Алгоритм формирования панорамы изображений для расчета единого поля смещений и модифицированный алгоритм расчета векторного поля, отличающиеся от известных совместным применением методов передискретизации изображения и шаблонного поиска и позволяющие работать в широком диапазоне деформаций.
3. Результаты исследования эффективности и пределов применимости разработанного алгоритмического и программного обеспечения, полученные на основе модельных и экспериментальных данных и позволяющие обосновать выбор параметров расчета единого поля смещений.

**Практическая ценность и реализация результатов работы.** Практически значимыми являются алгоритмы и аналитические оценки, полученные в результате диссертационного исследования. Разработанные программные средства для формирования единого векторного поля по оптическим изображениям нагруженного материала или отдельным векторным полям дают возможность исследовать механизмы деформации и разрушения материала в масштабе исследуемого объекта.

Созданные программные средства были апробированы при решении задачи контроля механического состояния сварных соединений магистральных трубопроводов. Полученные результаты, алгоритмическое и программное обеспечение комплекса «FieldMetter» были внедрены в ООО «Регионгазстрой» (г. Новый Уренгой). Внедрение подтверждено соответствующим актом.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Алгоритм формирования единого поля векторов смещений по совокупности перекрывающихся векторных полей, позволяющий увеличить размер исследуемой области и снизить погрешность измерения смещений.
2. Алгоритм формирования панорамы изображений и модифицированный алгоритм расчета поля векторов смещений, основанные на передискретизации и шаблонном поиске и дающие возможность снизить вычислительную сложность.
3. Фрактальная размерность как критерий качества текстуры оптических изображений, позволяющая выбирать входные параметры при формировании панорамы и расчете единого векторного поля.

4. Алгоритм оценки погрешности объединения перекрывающихся изображений, основанный на линейном характере смещений при однородной деформации.

5. Совокупность результатов модельных и натурных экспериментов по исследованию эффективности и пределов применимости разработанного алгоритмического и программного обеспечения, подтверждающая возможность оценки текущего механического состояния материалов.

**Связь работы с научными программами и темами.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательской работы ИФПМ СО РАН: проект РФФИ № 07-08-00060 «Исследование полей деформаций и диагностика усталостного разрушения материалов на основе анализа оптических изображений поверхности» (2007-2009 гг.), проект 2.2 «Диагностика механического состояния материалов на основе измерения деформации методом корреляции цифровых изображений и фрактального анализа поверхности» программы № 2 ОЭММПУ РАН на 2009-2011 гг., проект 2.16.1 «Динамика деформационной структуры и контроль состояния сварных соединений конструкционных сталей на основе метода корреляции цифровых изображений в условиях переменного силового воздействия» программы № 2.16 ОЭММПУ РАН на 2012-2014 гг., проект III.20.1.3 «Разработка методологии и критериев диагностики состояния нагруженных материалов на основе многоуровневого подхода» программы III.20.1 фундаментальных исследований СО РАН на 2010-2012 гг.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях, семинарах: Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (г. Томск, 2006), VI Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиноведения» (г. Гомель, Беларусь, 2006), III Российской научно-технической конференции «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2007), II 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 школе-семинаре «Многоуровневые подходы в физической мезомеханике. Фундаментальные основы и инженерные приложения» (г. Томск, 2008), Международной научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» (г. Томск, 2008), XXXVIII Уральском семинаре «Механика и процессы управления» (г. Екатеринбург, 2008), IV Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2009), XVII Международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» (г. Самара, 2009), XXIX Российской школе «Наука и технологии» (г. Екатеринбург, 2009), Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (г. Томск, 2009), III Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (г. Москва, 2009), VI Всероссийской конференции «Ме-

ханика микронеоднородных материалов и разрушение» (г. Екатеринбург, 2010), V Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 2010), V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2011), Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов (г. Томск, 2011), 52 Международной научной конференции «Актуальные проблемы прочности» (г. Уфа, 2012).

**Публикации.** Основные результаты работы отражены в 34 публикациях: 5 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 11 докладов в сборниках трудов конференций, 15 тезисов докладов.

**Личный вклад** соискателя заключается в совместной с научным руководителем постановке цели и задач исследования, в самостоятельном написании и отладке программ, в получении, обработке и анализе результатов представляемой к защите работы, обсуждении результатов, написании в соавторстве научных работ, формулировке выводов и положений, выносимых на защиту.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения. Она изложена на 156 страницах, содержит 58 рисунков, 1 таблицу, 2 приложения. Список цитируемой литературы включает 133 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, показывается научная новизна и практическая значимость полученных результатов и приводится краткое содержание работы по разделам.

**Первый раздел** диссертации носит обзорный характер. Выполнен обзор основных известных экспериментальных методов измерения полей смещений и деформации, приведены их сравнительные характеристики.

Показано, что метод корреляции цифровых изображений при сравнительно невысокой стоимости аппаратуры обладает хорошим разрешением и значительной плотностью векторов смещений. Однако, с ростом оптического увеличения быстро падает размер исследуемой области, что существенно ограничивает поле зрения. Этот недостаток можно устранить путем объединения перекрывающихся полей векторов смещений (формирование единого векторного поля) или изображений поверхности материала (построение панорамы). С другой стороны, проведение исследований в пределах контролируемой области с большим оптическим увеличением позволяет существенно снизить абсолютную погрешность и увеличить чувствительность измерений.

При использовании данного подхода метод КЦИ по совокупности характеристик (поле зрения, разрешение, плотность векторов смещений, сложность измерений) становится более эффективным для исследования механизмов деформации и разрушения материалов.

Рассмотрены методы построения панорамы по совокупности оптических изображений поверхности материала.

На основе результатов анализа состояния проблемы в рамках диссертационной работы формулируются цель и задачи исследований.

**Во втором разделе** изложено получение единого векторного поля (полного поля смещений) путем объединения перекрывающихся векторных полей.

Для повышения точности и разрешающей способности метода КЦИ изображения поверхности материала обычно фиксируют с помощью оптического микроскопа. С ростом оптического увеличения микроскопа возрастает чувствительность и точность данного метода. Однако, при этом уменьшается поле зрения микроскопа, которое может стать меньше размеров исследуемой области.

В ряде случаев принципиально невозможно получить качественную панораму вследствие тех или иных причин. Например, отклонения плоской поверхности исследуемого материала от фокальной плоскости микроскопа приводят к расфокусировке изображений. Возможна также ситуация, когда деформация имеет очень неоднородный пространственный характер. В этом случае в областях со сравнительно малой деформацией желательно применять светофильтры или иной режим измерений (например, дифференциальный интерферометрический контраст (ДИК)), что позволит измерять малые смещения. Однако, в областях с большой деформацией измерение в данных условиях приведет к значительной погрешности расчета векторного поля, поэтому съемка со светофильтрами или в режиме ДИК здесь нецелесообразна. Изображения, полученные в разных режимах измерений (светофильтры, ДИК, без фильтров), нельзя объединить в качественную панораму, но в процессе нагружения можно получить поля векторов смещений. Таким образом, возникает необходимость формирования единого векторного поля на основе отдельных полей смещений, имеющих общую область.

Опыт экспериментальных исследований показывает, что поля смещений, полученные в разных областях поверхности материала, имеющие общую область, как правило, не совпадают в области перекрытия. Это связано, с одной стороны, с тем, что каждое из векторных полей измеряется с точностью до постоянного вектора (вектора рассогласования), а с другой стороны – каждый вектор фиксируется с некоторой абсолютной погрешностью. Значения вектора рассогласования могут различаться для разных полей смещений. При формировании единого поля смещений необходимо согласовать два векторных поля по этой постоянной составляющей.

Рассмотрим два векторных поля  $\vec{u}_A(x, y)$  и  $\vec{u}_B(x', y')$ , измеренные в областях  $A$  и  $B$ , которые имеют общую область  $C$  ( $C = A \cap B$ ). Будем считать, что погрешность измерения равна нулю. Эти поля можно описать уравнениями

$$\vec{u}_A(x, y) = \vec{u}_1(x, y) + \vec{u}_{01}, \quad \vec{u}_B(x', y') = \vec{u}_2(x', y') + \vec{u}_{02}. \quad (1)$$

Уравнения для векторных полей записаны в форме, при которой в явном виде выделен постоянный вектор, значения проекций которого постоянны в каждой точке области. Здесь  $\vec{u}_1(x, y) = u_{1x}(x, y)\vec{e}_x + u_{1y}(x, y)\vec{e}_y$  – векторное поле в первой области ( $A$ );  $\vec{u}_2(x', y') = u_{2x}(x', y')\vec{e}_x + u_{2y}(x', y')\vec{e}_y$  – векторное поле во второй области ( $B$ );  $\vec{e}_x, \vec{e}_y$  – соответствующие орты;  $x, y$  ( $x', y'$ ) – координаты декартовой системы для первого (второго) векторных полей;  $\vec{u}_{01} = u_{01x}\vec{e}_x + u_{01y}\vec{e}_y$  и  $\vec{u}_{02} = u_{02x}\vec{e}_x + u_{02y}\vec{e}_y$  – постоянные векторы, не зависящие от координат.

Вычислим разность векторов смещений для некоторого относительного положения этих векторных полей

$$\vec{u}_B(x', y') - \vec{u}_A(x, y) = (u_{2X}(x', y') - u_{1X}(x, y))\vec{e}_X + (u_{2Y}(x', y') - u_{1Y}(x, y))\vec{e}_Y + \Delta\vec{u}_0,$$

где  $\Delta\vec{u}_0 = (u_{02X} - u_{01X})\vec{e}_X + (u_{02Y} - u_{01Y})\vec{e}_Y$  – постоянная составляющая. При сканировании второго поля относительно первого рано или поздно значения соответствующих координат совпадут. То есть, выполняются условия  $x = x'$ ,  $y = y'$ . При этом должны также совпасть в каждой точке и значения векторного поля в общей области  $C$

$$u_{2X}(x', y') = u_{1X}(x, y), \quad u_{2Y}(x', y') = u_{1Y}(x, y). \quad (2)$$

Следовательно

$$\vec{u}_B(x, y) - \vec{u}_A(x, y) = \Delta\vec{u}_0. \quad (3)$$

В области перекрытия разность соответствующих векторов смещений становится постоянным вектором – вектором рассогласования  $\Delta\vec{u}_0$ , который не зависит от координат и равен разности постоянных составляющих соответствующих векторных полей.

Покажем принципиальную возможность нахождения координат перекрытия векторных полей. Воспользуемся свойством абсолютных величин  $|a \pm b| \leq |a| + |b|$ . Тогда для области  $D = A \cup B - A \cap B$  справедливо неравенство

$$|\vec{u}_B - \vec{u}_A| \leq |u_{1X}| + |u_{2X}| + |u_{1Y}| + |u_{2Y}| + |u_{01X}| + |u_{01Y}| + |u_{02X}| + |u_{02Y}|. \quad (4)$$

Для области  $C$  неравенство (4) с учетом (2) приобретает вид

$$|\vec{u}_B - \vec{u}_A| \leq |u_{01X}| + |u_{01Y}| + |u_{02X}| + |u_{02Y}|. \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует, что  $|\vec{u}_B - \vec{u}_A|_C \leq |\vec{u}_B - \vec{u}_A|_D$ , если деформация отлична от нуля.

Следовательно, координаты перекрытия полей могут быть найдены путем сканирования одного векторного поля относительно другого, где критерием результата поиска является минимум функционала  $Sa$ , связанного с модулем разности проекций соответствующих векторов смещений.

$$Sa_{k,l} = \left[ \sum_{i=1}^{I-k} \sum_{j=1}^l |u_{2X_{i+k, J-l+j}} - u_{1X_{i,j}}| + |u_{2Y_{i+k, J-l+j}} - u_{1Y_{i,j}}| \right] / (I-k)l,$$

где  $k = 0, 1, 2, 3 \dots I-1$ ,  $l = 1, 2, 3 \dots J$ . Здесь  $I(J)$  – количество строк (столбцов) массива, характеризующего векторное поле;  $u_{1X_{i,j}}$  и  $u_{2X_{i,j}}$  ( $u_{1Y_{i,j}}$  и  $u_{2Y_{i,j}}$ ) – компоненты

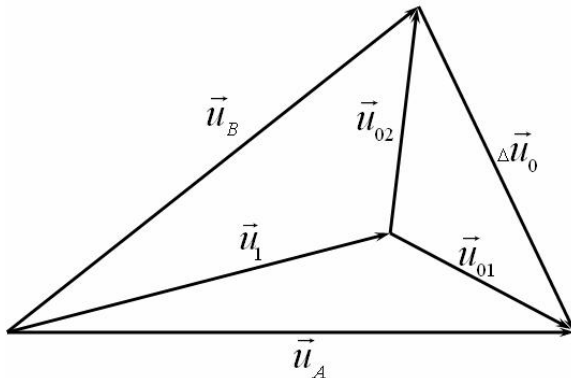


Рис. 1. Взаимосвязь постоянных составляющих векторных полей в области перекрытия  $C$

смещений в направлении оси  $X(Y)$  первого (второго) векторного поля. Каждая пара массивов отражает проекции вектора на оси координат.

После нахождения координат перекрытия необходимо согласовать оба векторных поля по постоянной составляющей. Это согласование иллюстрирует векторная диаграмма, приведенная на рис. 1.

Пусть  $\vec{u}_1$  – вектор смещения некоторой точки, находящейся в области

перекрытия  $C$  в системе координат, где постоянная составляющая равна нулю.

Реально в данной точке области  $A$  измеренный вектор смещения будет составлять  $\vec{u}_A$  вследствие влияния постоянного вектора  $\vec{u}_{01}$  (1). Этот же вектор смещения, измеренный в области  $B$ , принимает значение  $\vec{u}_B$ , поскольку постоянный вектор здесь равен  $\vec{u}_{02}$ . Если первое векторное поле (в области  $A$ ) считать базовым, то, чтобы получить во второй области тот же вектор  $\vec{u}_A$ , следует к вектору  $\vec{u}_B$  (и к каждому вектору поля в области  $B$ ) добавить вектор рассогласования  $\Delta\vec{u}_0$  (3).

Значения вектора рассогласования  $\Delta\vec{u}_0$  можно рассчитать по значениям проекций векторов в области перекрытия  $C$  путем их усреднения

$$\Delta u_{0X} = \left[ \sum_{i=1}^{I-k'} \sum_{j=1}^{l'} (u_{2X_{i+k', J-l'+j}} - u_{1X_{i,j}}) \right] / (I-k')l',$$

$$\Delta u_{0Y} = \left[ \sum_{i=1}^{I-k'} \sum_{j=1}^{l'} (u_{2Y_{i+k', J-l'+j}} - u_{1Y_{i,j}}) \right] / (I-k')l'. \quad (6)$$

Здесь  $k', l'$  – индексы, соответствующие координатам области перекрытия.

Погрешность измерения поля векторов смещений во многом определяется характеристиками измерительной системы и условиями эксперимента. Точность измерения вектора смещения зависит от получаемого при съемке изображения, по которому этот вектор рассчитывается.

При построении единого поля векторов смещений из совокупности векторных полей при наличии погрешности проблема минимизации ошибки нахождения координат сдвига является актуальной. Для решения указанной проблемы автором проведено исследование влияния шумов на точность нахождения координат перекрытия с использованием разностного  $Sa$ , квадратичного  $Sb$ , разностного нормированного  $Sc$  и квадратичного нормированного  $Sd$  функционалов.

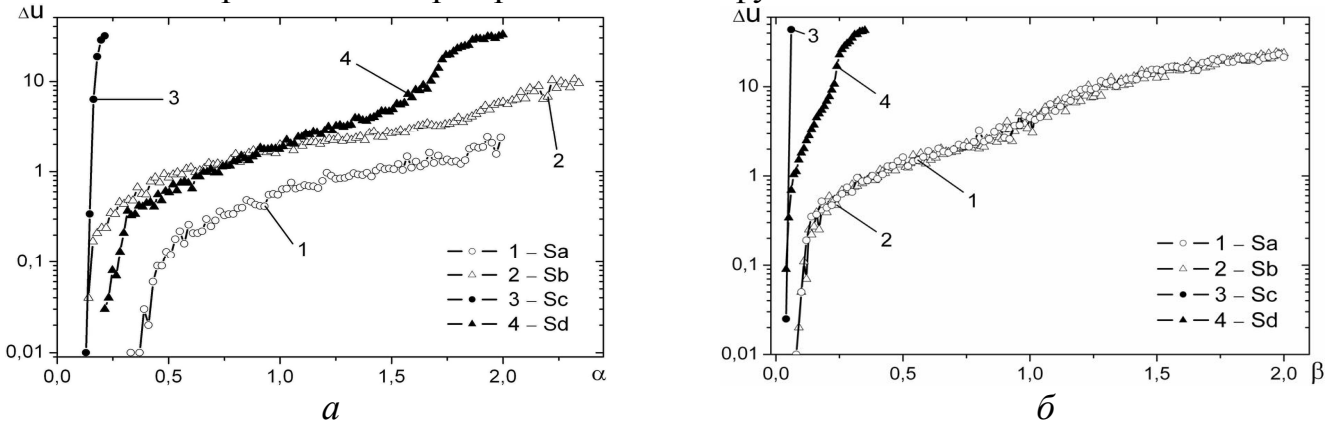


Рис. 2. Зависимости ошибки определения координат сдвига  $\Delta u$  от уровня мультипликативной  $\alpha$  (а) и аддитивной  $\beta$  (б) погрешностей для функционалов  $Sa$ – $Sd$

Исследование проводилось с использованием модельных векторных полей содержащих мультипликативный шум  $\alpha$  или аддитивный шум  $\beta$  с нормальным законом распределения. Результаты исследования приведены на рис. 2.

Видно, что независимо от вида шума (мультипликативный или аддитивный) наиболее устойчивым является функционал, связанный с модулем разности.

При поиске координат сдвига по базовому алгоритму, когда происходит сканирование одного массива, как целого, относительно другого, требуется значительное время поиска. Алгоритм скользящего окна дает возможность снизить время расчета, по крайней мере, на порядок.

Путем математического моделирования методом Монте-Карло было оценено влияние погрешности измерения векторов на точность нахождения координат сдвига, используя алгоритм скользящего окна. Исследование проводилось на модельных векторных полях, содержащих аддитивный шум  $\beta_\alpha$  с нормальным законом распределения для разностного, квадратичного и корреляционного функционалов.

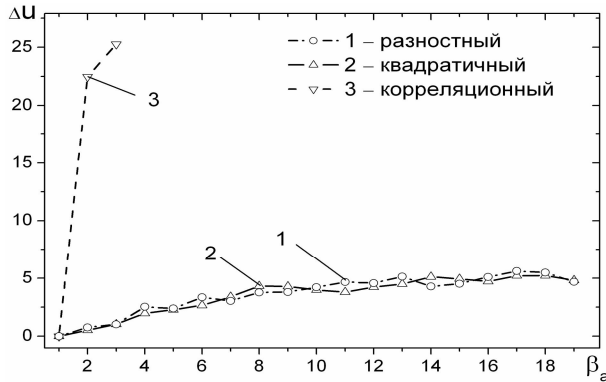


Рис. 3. Зависимость ошибки нахождения координат сдвига  $\Delta u(\beta_\alpha)$  для разностного (1), квадратичного (2) и корреляционного (3) функционалов. Размер окна равен  $17 \times 17$ , размер векторного поля —  $71 \times 51$

Видно (рис. 3), что корреляционный функционал в принципе позволяет находить координаты сдвига, но является неустойчивым по отношению к шуму, а разностный и квадратичный функционалы приблизительно эквивалентны.

Далее путем численного моделирования оценивалось влияние размера скользящего окна на точность нахождения сдвига.

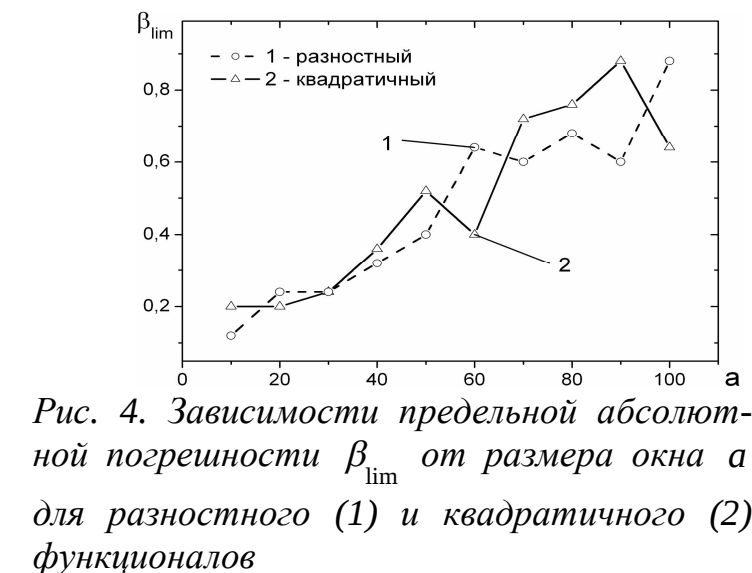


Рис. 4. Зависимости предельной абсолютной погрешности  $\beta_{lim}$  от размера окна  $a$  для разностного (1) и квадратичного (2) функционалов

Примем предельно допустимую ошибку при нахождении координат сдвига  $\Delta u_{lim}$  равной 2 пикселям. Ей будет соответствовать некоторое значение предельной погрешности  $\beta_{lim}$ . Такой подход позволяет построить зависимости  $\beta_{lim}(a)$ . Видно (рис. 4), что с ростом размера скользящего окна устойчивость разностного и квадратичного функционалов возрастает.

Для формирования единого векторного поля из двух исходных, имеющих общую область, необходимо выполнить следующие операции.

а) найти координаты сдвига векторных полей на основе разностного функционала;

б) оценить значения вектора рас-

согласования по формулам (6);

в) выбрав одно из векторных полей за базовое, согласовать эти поля смещений по постоянной составляющей (рис. 1);

г) построить единое векторное поле.

**Третий раздел** посвящен проблеме увеличения области исследуемой поверхности и уменьшения погрешности при измерении полей смещений и деформации материала путем объединения перекрывающихся изображений (построение панорамы).

Во втором разделе рассматривалась задача формирования единого поля векторов смещений из совокупности векторных полей. Однако, сформировать единое векторное поле можно, если каждое из векторных полей измерено в области перекрытия с хорошей точностью. Это не всегда оказывается возможным вследствие тех или иных факторов, связанных как с самим оптическим методом, так и условиями измерений, а также определяется алгоритмическим и программным обеспечением, выбором параметров расчета.

В частности, большая погрешность при расчете векторного поля может быть обусловлена неточной фокусировкой микроскопа и/или его настройкой, текстурой оптического изображения, малым уровнем деформации самого материала. В этом случае погрешность сшивки векторных полей может быть неприемлемо высокой.

Подход, рассматриваемый в данном разделе, связан с построением панорамы из нескольких изображений (по крайней мере, из двух), имеющих общую область.

На сегодняшний день существует множество программ по построению панорамы. Наиболее известными из них являются: Arcsoft Panorama Maker, Panorama Factory, Photovista Panorama, PTGui. Все они являются коммерческими продуктами с закрытым исходным кодом. Эти программы были протестированы на оптических изображениях поверхности материала с малым модулем Юнга (резина). При построении панорамы они показали большую погрешность (см. рис. 8), поэтому возникла необходимость в разработке собственной программы для построения панорамы с целью последующего расчета полей смещений и деформации.

В работе исследованы три алгоритма построения панорамы: алгоритм реперных точек, скользящего окна и модифицированный алгоритм. Применение того или иного алгоритма зависит от качества текстуры.

Для оценки качества текстуры изображений рассмотрены два основных критерия – информационная энтропия и фрактальная размерность. Для определения фрактальной размерности был выбран метод треугольных призм как наиболее устойчивый к шумам и имеющий небольшие вычислительные затраты. Методом Монте-Карло исследована зависимость абсолютной погрешности нахождения координат сдвига изображений от качества текстуры изображений и связь последней с информационной энтропией и фрактальной размерностью (рис. 5).

Видно (рис. 5а), что при высоком качестве текстуры (высоком значении фрактальной размерности и информационной энтропии) абсолютная погрешность объединения изображений  $\Delta u$  минимальна даже при малом размере скользящего окна. При среднем качестве текстуры (среднем уровне фрактальной размерности и информационной энтропии) близкая к нулю погрешность сшивки достигается при большем размере скользящего окна.

Видно также, что эти зависимости носят пороговый характер: при заданном размере окна существует некоторый допустимый уровень качества текстуры, когда сшивка изображений оказывается еще возможной. Увеличение уровня шума (рис. 5б) приводит к возрастанию погрешности сшивки; при этом диапазон изменения

фрактальной размерности уменьшается, а диапазон изменения информационной энтропии существенно не изменяется.

Фрактальная размерность учитывает характер пространственного распределения элементов изображения, и в работе принята за базовый критерий качества текстуры.

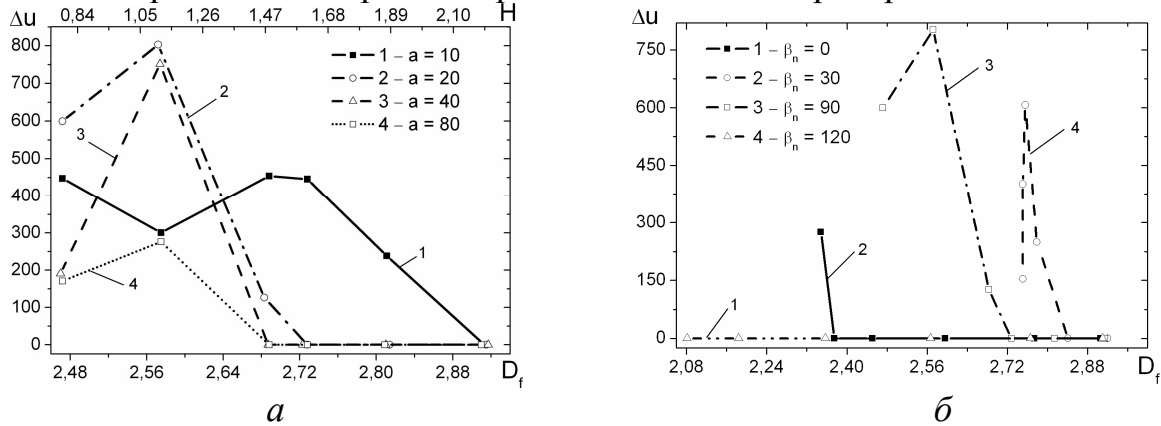


Рис. 5. Зависимости абсолютной погрешности объединения изображений  $\Delta u$  от фрактальной размерности  $D_f$  и информационной энтропии  $H$  при варьировании размера окна  $a$  при  $\beta_n = 90$  (а) и уровня шума  $\beta_n$  при  $a = 20$  (б)

При среднем качестве текстуры для построения панорамы в работе предлагается использовать алгоритм скользящего окна. Для данного алгоритма аналитически получена формула для выигрыша по времени по сравнению с базовым. Данная формула имеет следующий вид:

$$K = \Delta X (\Delta X + 1) (\Delta Y + 1) (\Delta Y + 2) / 2a^2 (\Delta X - a + 1) (\Delta Y - a + 1),$$

где  $\Delta X \times \Delta Y$  – размер области поиска,  $a$  – размер скользящего окна.

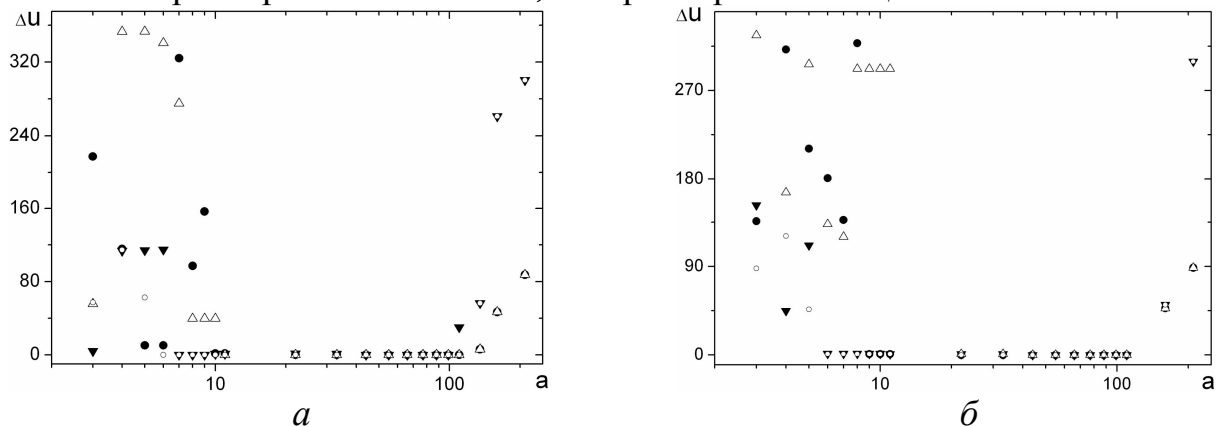


Рис. 6. Влияние размера окна  $a$  на ошибку определения координат сдвига  $\Delta u$  для разных областей выбора окна разностным (а) и корреляционным (б) функционалами. Размер исходных изображений  $400 \times 400$

Путем численного моделирования оценен минимальный размер скользящего окна с использованием разностного и корреляционного функционалов. Исследование проводилось на оптических изображениях сварного соединения стали 10Г2С. Результаты исследования приведены на рис. 6.

Видно (рис. 6), что существует некоторый диапазон размеров окна, в пределах которого функционалы работают устойчиво. Нижний порог обусловлен тем, что при малых размерах окна в их пространственном распределении возникает значительное

количество локальных ложных экстремумов. Конкретное значение предельного размера окна зависит от текстуры изображения и от погрешности регистрации изображений исследуемого участка поверхности.

Выбор функционала выполняли методом Монте-Карло. Были рассмотрены три функционала: разностный, квадратичный и корреляционный. Исследование проводилось с использованием оптических изображений стали 10Г2С, содержащих мультипликативный или аддитивный шум с нормальным законом распределения.

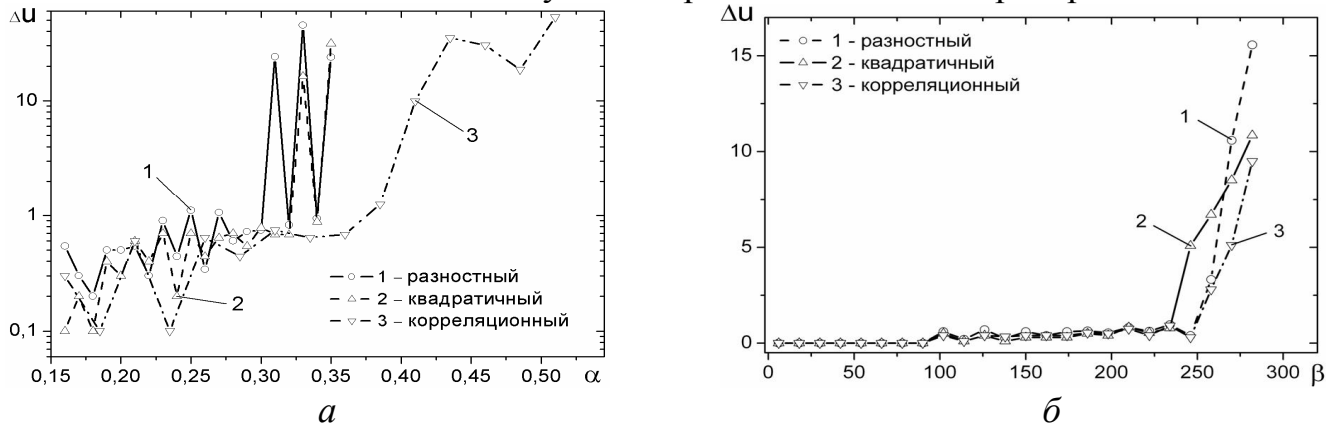


Рис. 7. Зависимость ошибки нахождения координат сдвига изображений  $\Delta u$  от мультипликативной  $\alpha$  (а) и аддитивной  $\beta$  (б) погрешностей для трех функционалов: разностного (1), квадратичного (2) и корреляционного (3). Размер окна  $25 \times 25$ , размер изображений –  $400 \times 400$

Видно (рис. 7), что независимо от вида шума и его уровня наиболее устойчивым является корреляционный функционал, а разностный характеризуется меньшей вычислительной сложностью.

Алгоритм реперных точек при формировании панорамы предлагается применять при низком качестве текстуры. Работа алгоритма заключается в следующем. На первом и втором изображении (до и после нагружения, соответственно) выбираются реперные (особые) точки. Затем, на первом изображении задается область поиска размером  $R \times R$  с координатами центра в реперной точке. На втором изображении задается эталонный участок размером  $m \times m$  с центром в особой точке. После этого производится сканирование эталонным участком в пределах области поиска и в каждом текущем положении рассчитывается значение функционала. Его глобальный экстремум позволяет найти относительный сдвиг изображений.

Модифицированный алгоритм предлагается применять для текстуры высокого качества. Для уменьшения вычислительной сложности предложено использовать модифицированный алгоритм нахождения координат перекрытия:

1 этап: передискретизация (понижение разрешения) эталонного участка и соответствующей области поиска. Размер эталонного участка до передискретизации  $m \times m$ , размер области поиска  $Ra \times Rb$ ;

2 этап: нахождение после передискретизации приближенных значений координат глобального экстремума на основе алгоритма скользящего окна;

3 этап: поиск точных значений координат экстремума вблизи приближенных в пределах области размером  $d \times d$  исходным, т. е. не прошедшим процедуру передискретизации, эталонным участком с помощью метода шаблонного поиска.

Для данного алгоритма аналитически получена формула для выигрыша по времени  $V$  по сравнению с алгоритмом скользящего окна. Данная формула имеет следующий вид:

$$V = \frac{(Ra - m + 1)(Rb - m + 1)k^4}{(Ra - m + k)(Rb - m + k) + 9k^4 \log_2(d - 1)},$$

где  $k$  – коэффициент передискретизации.

В работе предложен алгоритм оценки погрешности построения панорамы, основанный на монотонной пространственной зависимости продольных смещений, который заключается в следующем. С помощью тестируемой программы формируется панорама из двух перекрывающихся изображений, снятых до нагружения. Затем, создается панорама той же области, но после одноосного растяжения и рассчитывается векторное поле. По полученным массивам проекций векторов смещений строятся зависимости  $u_x(x, y = \text{const})$  и

(или)  $u_y(x = \text{const}, y)$  и оценивается погрешность.

Данный алгоритм был апробирован на известных программах построения панорамы Arcsoft Panorama Maker, Panorama Factory, Photovista Panorama, PTGui и программы, разработанной автором (Stitch Panorama). Результат тестирования представлен на рис. 8. Видно, что зависимости, связанные с программами Panorama Factory и Photovista Panorama имеют перегиб

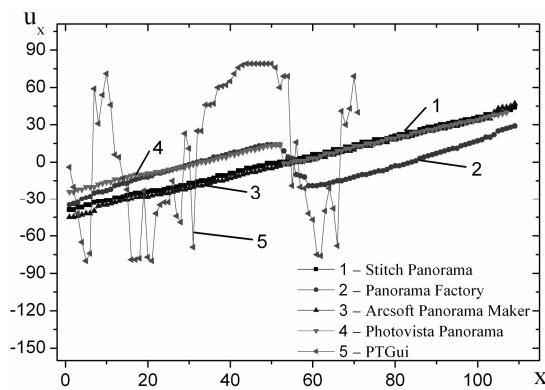


Рис. 8. Продольные смещения вдоль средней линии образца для различных программ формирования панорамы. Материал: резина

в области объединения изображений, что обусловлено ошибкой их объединения. Программа PTGui показала наихудшие результаты. График Arcsoft Panorama Maker на краях «завален» вследствие того, что данная программа автоматически исправляет дисторсию. Таким образом, наиболее работоспособной является программа Stitch Panorama.

Для снижения вычислительной сложности при построении поля векторов смещений предложено использовать модифицированный алгоритм, описанный выше. Здесь данный алгоритм применяется для нахождения координат сдвига элементарного участка.

В работе проведено исследование зависимости ошибки нахождения вектора смещения от коэффициента передискретизации. Показано, что эта зависимость носит пороговый характер. Если гистограмма яркости ограничена, то коэффициент передискретизации не может быть более 2. Для более качественных типов текстур этот коэффициент в принципе можно задавать на уровне  $k = 10 - 15$ .

Для данного алгоритма также получена формула для выигрыша по времени по сравнению с алгоритмом полного перебора:

$$V = \frac{(R - m + 1)^2 k^4}{(R - m + k)^2 + 9k^4 \log_2(d - 1)}.$$

Абсолютная погрешность измерения векторного поля определяется также входными параметрами компьютерной программы: размерами задаваемого эталонного участка и области поиска.

Для материала с однородной деформацией (резина) фиксировали два изображения (до и после деформации), рассчитывали векторное поле и среднюю деформацию при варьировании размеров эталонного участка и области поиска. Показано, что существует предельные размеры эталонного участка. Снизу он ограничен качеством текстуры и количеством информации, необходимой для уверенной идентификации вектора. Однако, размер эталонного участка не может быть и слишком большим, поскольку векторное поле по определению отражает смещения точек поверхности.

Размер области поиска пропорционален средней деформации материала  $\varepsilon$  и размеру изображения  $L$ . Его можно найти из неравенства  $R \geq m + \varepsilon L / 2$  при условии совмещения изображений по некоторой центральной точке. Такой выбор параметров позволяет проводить измерения в широком диапазоне деформаций.

В четвертом разделе приведена апробация разработанного алгоритмического и программного обеспечения на примере исследования механизмов деформации и разрушения сварных соединений конструкционной стали 10Г2С в условиях повторно-статической, многоциклового усталости и при наличии дефектного сварного соединения. Рассмотрено аппаратное и программное обеспечение комплекса «FieldMetter» для оценки механического состояния сварных соединений, внедренное в ООО «Регионгазстрой» (г. Новый Уренгой).

Механизм деформации и разрушения сварных соединений стали 10Г2С экспериментально исследовали при *повторно-статической усталости* ( $\sigma = 150 \pm 150$  МПа). Все испытания выполняли по схеме одноосного циклического растяжения. Изображения поверхности материала фиксировали как в области сварного шва, так и в зоне

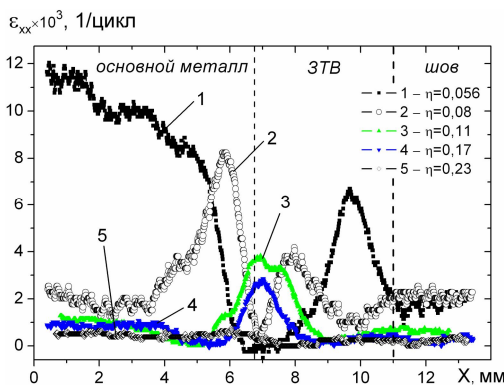


Рис. 9. Эволюция деформации вдоль линии «ОМ-ЗТВ-шов»

термического влияния (ЗТВ) вплоть до основного металла (ОМ) с перекрытием. В результате компьютерной обработки изображений рассчитывали поля смещений и деформацию.

Обнаружено, что в процессе разрушения можно выделить три типичные стадии.

*Первая стадия* ( $0 < \eta \leq 0,2$ ) связана с активным пластическим течением материала сварного соединения, его деформационным упрочнением, формированием и развитием солитоноподобных структур локализованной пластической деформации (ЛПД). Здесь

$\eta = N / N_{\Sigma}$ , где  $N$  – текущее число циклов нагружения,  $N_{\Sigma}$  – число циклов до разрушения,  $\eta$  – циклическое отношение.

*Вторая стадия* ( $0,2 < \eta \leq 0,95$ ) обусловлена процессом накопления повреждений и пластическим течением преимущественно в области основного металла.

*Третья стадия* ( $0,95 < \eta \leq 1$ ) является самой короткой. В области основного металла вблизи одного из захватов в результате активного пластического течения формируется магистральная трещина. Ее берега раскрываются по схеме нормального отрыва, и в течение нескольких циклов происходит разрушение.

Были выполнены экспериментальные исследования механизма разрушения сварных соединений стали 10Г2С в условиях многоциклового усталости ( $\sigma = 100 \pm 100$  МПа).

В процессе разрушения также можно выделить три типичные стадии.

*Первая стадия* ( $0 < \eta \leq 0,15$ ) обусловлена деформационным упрочнением материала, формированием и развитием фронтов ЛПД.

*Вторая стадия* ( $0,15 < \eta \leq 0,6$ ) связана с формированием усталостной трещины. Деформация имеет убывающий характер, она неоднородна и в среднем весьма незначительна.

*Третья стадия* ( $0,6 < \eta \leq 1$ ) характеризуется развитием доминирующей трещины.

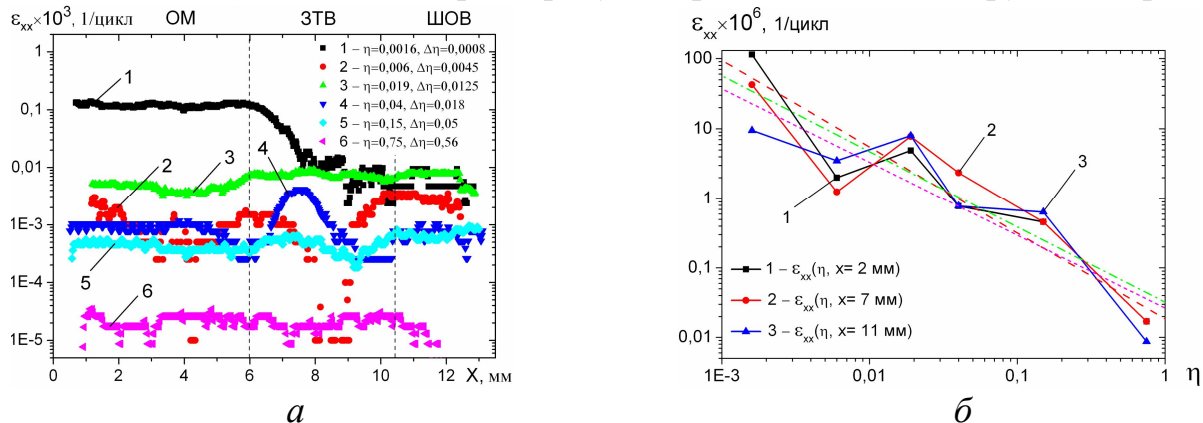


Рис. 10. Эволюция деформации (а) и её зависимость от циклического отношения (б)

Экспериментальные исследования механизма разрушения дефектного сварного соединения стали 10Г2С задавали в условиях многоциклового усталости ( $\sigma = 100 \pm 100$  МПа), но разрушение наступило на два порядка раньше вследствие наличия дефекта в сварном соединении – через 100 циклов нагружения на границе «ЗТВ-шов» была обнаружена усталостная трещина. В процессе нагружения фиксировали изображения поверхности в области «ОМ–ЗТВ–шов–ЗТВ–ОМ» вдоль средней линии.

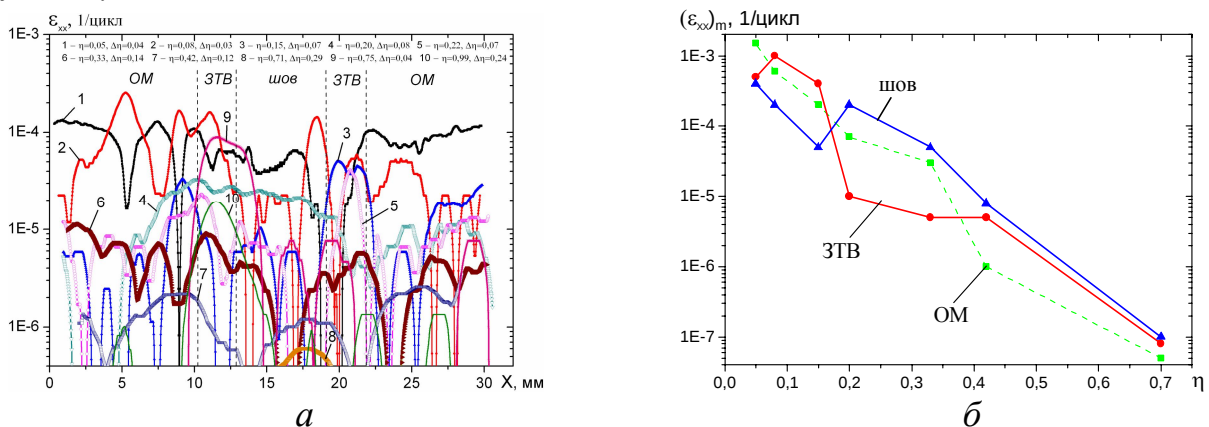


Рис. 11. Эволюция деформации в масштабе сварного соединения (а) и её зависимость от циклического отношения (б)

В процессе разрушения можно выделить три типичные стадии.

*Первая стадия* ( $0 \leq \eta < 0,2$ ) обусловлена деформационным упрочнением и развитием полос Чернова-Людерса, мезополос сдвига, фронтов ЛПД различного масштаба.

Стабильный рост трещины на *второй стадии* ( $0,2 \leq \eta < 0,7$ ) связан с постепенным исчерпанием ресурса пластичности.

Последняя, *третья стадия* ( $0,7 \leq \eta \leq 1$ ) определяется развитием магистральной трещины.

Несмотря на то, что процессы деформации и разрушения имеют сложный пространственно-неоднородный и прерывистый во времени характер, формирование единого векторного поля в сочетании с дополнительной математической обработкой позволяют эффективно исследовать эти процессы на мезо- и макромасштабных уровнях.

Определяя значение циклического отношения по тому или иному параметру (деформации, скорости роста трещины, амплитуды, скорости раскрытия ее вершины и др.) и зная время работы материала (изделия), можно оценить его текущее механическое состояние и остаточный ресурс (рис.10, 11).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Предложен алгоритм формирования единого векторного поля по совокупности перекрывающихся векторных полей, основанный на их согласовании и последующем совмещении по постоянной составляющей (вектору рассогласования). Значения её проекций рассчитываются на основе полученных аналитических выражений. Это позволяет увеличить размер исследуемой области материала и снизить погрешность определения смещений.

2. Методами численного моделирования исследовано влияние размера скользящего окна, вида функционала на точность определения координат сдвига перекрывающихся изображений. Показано, что корреляционный функционал является наиболее устойчивым к воздействию шумов; аналитически получена формула для выигрыша по времени, позволяющая оценить вычислительную сложность алгоритма.

3. Разработаны алгоритм формирования панорамы изображений и модифицированный алгоритм расчета поля векторов смещений, основанные на передискретизации и шаблонном поиске. Исследовано влияние текстуры, коэффициента передискретизации и размеров области поиска на погрешность сшивки и точность определения вектора смещения. Аналитически получена формула для выигрыша по времени для обоих алгоритмов, позволяющая оценить их вычислительную сложность.

4. Предложено использовать информационную энтропию и фрактальную размерность как критерии оценки качества текстуры оптических изображений, характеризующиеся однозначным соответствием с качеством текстуры и имеющие невысокую вычислительную сложность. На основе данных критериев осуществляется выбор параметров, близких к оптимальным, для эффективного получения панорамы и единого векторного поля.

5. Предложен алгоритм оценки погрешности объединения перекрывающихся изображений, основанный на линейном характере смещений при однородной деформации. С помощью данного алгоритма были протестированы известные программы формирования панорамы и показано, что они не пригодны для точной сшивки изображений с целью последующего измерения векторных полей методом корреляции цифровых изображений.

6. Проведена апробация разработанных программных средств на примере исследования эволюции деформации и разрушения сварных соединений конструкционной стали 10Г2С при циклическом растяжении. Осуществлено внедрение способа оценки механического состояния сварных соединений магистральных трубопроводов с использованием средств комплекса «FieldMetter» в ООО «Регионгазстрой» (г. Новый Уренгой).

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

#### *Журналы, рекомендованные ВАК*

1. Кибиткин В.В., **Солодушкин А.И.**, Плешанов В.С. Формирование единого поля смещений путем объединения векторных полей при измерении деформации материалов // Дефектоскопия. – 2011. – № 1. – С. 84–97.
2. Кибиткин В.В., **Солодушкин А.И.**, Плешанов В.С., Лычагин Д.В. Формирование единого изображения поверхности материала для измерения поля смещений и деформации // Автометрия. – 2011. – Т. 47. – № 4. – С. 83–90.
3. **Солодушкин А.И.**, Кибиткин В.В., Плешанов В.С. Модифицированный алгоритм расчета поля векторов смещений для оценки деформации // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 48–51.
4. Кибиткин В.В., Плешанов В.С., **Солодушкин А.И.** Модель деформационной структуры усталостной трещины смешанного типа (I+II) // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – Спец. выпуск. – С. 57–60.
5. Кибиткин В.В., **Солодушкин А.И.**, Плешанов В.С., Чертова Н.В. Критерии идентификации вихревых структур в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. – 2013. – Т. 16. – № 2. – С. 53–63.

#### *Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ*

1. **Солодушкин А.И.**, Кибиткин В.В., Плешанов В.С. Программа объединения перекрывающихся полей векторов смещений для расчета деформации материала // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614246. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 30.06.2010 г.
2. **Солодушкин А.И.**, Кибиткин В.В., Плешанов В.С. Программа объединения перекрывающихся изображений поверхности деформируемого материала // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010615381. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 20.08.2010 г.
3. **Солодушкин А.И.**, Кибиткин В.В., Плешанов В.С. Программа расчета векторных полей для широкого диапазона деформаций материала // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011612423. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 23.03.2011 г.

#### *Другие научные издания*

1. Плешанов В.С., Кибиткин В.В., Напряшкин А.А., **Солодушкин А.И.** Измерение деформации материалов методом корреляции цифровых изображений // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – Приложение. – С. 343–349.
2. Плешанов В.С., Напряшкин А.А., **Солодушкин А.И.**, Сапожников С.В., Кибиткин В.В. Оценка механического состояния деталей машин и элементов конструкций методом оптического потока // Тезисы докладов VI Международной научно-

технической конференции "Современные проблемы машиноведения", 19–20 октября, 2006 г. – Гомель, Беларусь, 2006. – С.15.

3. **Солодушкин А.И.**, Кибиткин В.В., Плешанов В.С. Алгоритм объединения смежных полей смещений для анализа состояния деформируемых материалов // Тезисы докладов III Российской научно-технической конференции «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций», 24–26 апреля 2007 г. – Екатеринбург, Россия, 2007. – С. 13.

4. 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", 23–26 июня 2008 г. – Санкт-Петербург, Россия, 2008. – Т. I. – С. 267–268.

5. **Солодушкин А.И.**, Кибиткин В.В., Плешанов В.С. Выбор оптимального алгоритма при объединении перекрывающихся изображений поверхности нагруженных изделий // Труды XVII Международной конференции "Физика прочности и пластичности материалов", 23–25 июня 2009 г. – Самара, Россия: Самарский гос. техн. ун-т, 2009. – Т. II. – С. 81–84.

6. Кибиткин В.В., Напряшкин А.А., **Солодушкин А.И.**, Плешанов В.С. Оценка механического состояния сварных соединений конструкционной стали методом корреляции цифровых изображений // Тезисы докладов IV Российской научно-технической конференции "Ресурс и диагностика материалов и конструкций", 26–28 мая 2009 г. – Екатеринбург, Россия, 2009. – С. 7.

7. **Солодушкин А.И.**, Кибиткин В.В., Плешанов В.С. Выбор алгоритма сканирования при формировании единого поля смещений // Тезисы докладов Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, 7–11 сентября 2009 г. – Томск, Россия, 2009. – С. 463–465.

8. Кибиткин В.В., Плешанов В.С., Напряшкин А.А., **Солодушкин А.И.** Оценка остаточного ресурса сварных соединений методом корреляции цифровых изображений // Сборник материалов третьей Международной конференции "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов", 12–15 октября 2009 г. – Москва, Россия: Интерконтакт Наука, 2009. – Т. 2. – С. 177–178.

9. Кибиткин В.В., **Солодушкин А.И.**, Плешанов В.С. Расчет характеристик деформации материала методом корреляции цифровых изображений // Тезисы докладов V Российской научно-технической конференции "Ресурс и диагностика материалов и конструкций", 25–29 апреля 2011 г. – Екатеринбург, Россия, 2011. – С. 137.

10. Кибиткин В.В., **Солодушкин А.И.**, Плешанов В.С. Влияние входных параметров на погрешность измерения деформации методом корреляции цифровых изображений // Тезисы докладов Международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, 5–9 сентября 2011 г. – Томск, Россия, 2011. – С. 61–63.

11. Кибиткин В.В., Плешанов В.С., **Солодушкин А.И.**, Егоров В.И. Механизм усталостного разрушения дефектного сварного соединения стали 10Г2С // Тезисы докладов 52 Международной научной конференции "Актуальные проблемы прочности", 4–8 июня 2012 г. – Уфа, Россия, 2012. – С. 34–35.