

*На правах рукописи*

**ПАВЛИЧЕВ КИРИЛЛ ВИКТОРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА СПЕКЛ-  
ФОТОГРАФИЙ И ЭЛЕКТРОННЫХ СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ  
ДЕФОРМАЦИИ**

Специальность 05.11.13 – приборы и методы контроля  
природной среды, веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН и ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
***Зуев Лев Борисович***

Научный консультант: кандидат физико-математических наук  
***Горбатенко Вадим Владимирович***

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
***Герасимов Сергей Иванович***  
кандидат физико-математических наук, доцент  
***Зыков Илья Юрьевич***

Ведущая организация: ***Учреждение Российской академии наук  
Институт прикладной механики УрО РАН***

Защита состоится 19 апреля 2011 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, институт неразрушающего контроля, зал заседаний 2-й этаж.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, д. 53.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.269.09  
по защите докторских и кандидатских диссертаций,

кандидат технических наук, доцент



Б.Б. Винокуров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Традиционно одной из интереснейших в теоретической и прикладной физике является проблема деформации твердого тела. И это не случайно, так как данная проблема связана с насущными потребностями современного производства: различного рода деформации материалов в конструкциях и объектах способны не только вывести из строя отдельные механизмы, но и привести к катастрофическим последствиям (разрушению мостов, зданий и т. д.). Развитие современного производства тесно связано с решением задач прочности. Первым и важнейшим этапом в решении этих задач при проектировании конструкций (машин, объектов) является определение деформаций, напряжений и перемещений в их элементах, воспринимающих нагрузки. Сложность этих задач в настоящее время требует применения экспериментальных и численных методов, получивших в последние годы существенное развитие.

Высокая эффективность современных численных методов теории упругости и пластичности, использующих ЭВМ, не устраняет необходимость применения экспериментальных методов при решении различного рода теоретических и практических задач. Существуют задачи определения полей деформаций и напряжений и задачи определения деформаций и напряжений в известных заранее точках или сечениях детали. Когда необходимо установить в элементе конструкции наиболее напряженные точки и сечения или получить для расчета значения градиентов деформаций и напряжений, решают задачу определения полей деформаций и напряжений. Кроме того, эту задачу необходимо решать и при обеспечении прочности, жесткости и снижения материалоемкости конструкций, а также в тех случаях, когда распределение деформаций и напряжений в процессе работы конструкции изменяется. Поэтому так важно использование эффективных методов определения точности и достоверности полученных экспериментальных данных.

В настоящее время при измерении деформаций твердого тела применяются различные методы, прошедшие достаточно длительный путь развития. Их описание и анализ практического применения для исследования деформаций, напряжений и перемещений в элементах конструкций при их испытаниях в лаборатории, на стендах и в эксплуатационных условиях содержится в многочисленных публикациях отечественных и зарубежных авторов. Традиционные экспериментальные методы (сетки, муар, фотоупругость и др.) различаются уровнем сложности подготовки и проведения исследований, применяемой аппаратурой, особенностями взаимодействия с образцами, а также материалом, из которого эти образцы изготовлены, чувствительностью, точностью результатов и др.

Один из самых распространенных экспериментальных методов – измерение с помощью механических и оптических тензометров. Несмотря на разнообразие конструктивных исполнений, в основе их работы лежит определение изменения базы, ограниченной считывающими элементами тензометра. Различные типы тензометров применяются для решения ряда задач изучения деформаций: измерения деформаций в отдельных точках (датчики механические, оптические, струнные, емкостные, пьезоэлектрические, индуктивные и др.) и для получения обобщенной картины деформированного состояния (электротензометры). К их достоинствам относятся возможность измерения в труднодоступных местах и большое отдалении от регистрирующей аппаратуры, обработка результатов в реальном времени, низкая инерционность. Недостатки метода состоят в однократности использования тензорезисторов, зависимости результатов измерений от условий окружающей среды, например температуры, и качества монтажа датчика.

Наиболее простым из оптических методов в плане используемой аппаратуры является метод делительных сеток, который по изменению расположения и конфигурации нанесенных на исследуемую поверхность систему точек и линий позволяет определить перемещения, деформации, скорости и другие исследуемые величины. Фиксируемую оптическую

картину перемещений при деформациях можно получить методом муаровых полос (логическим продолжением метода сеток), который основан на явлении образования квазиинтерференционных полос (оптическая картина перемещений получается при наложении друг на друга деформированного образца с нанесенной на него измерительной решетки и эталонной решетки).

Поляризационно-оптический метод (метод фотоупругости) используют при определении напряженного состояния модели деталей и конструкций, выполненных из прозрачных оптически чувствительных материалов. Он основан на поляризации света и свойстве большинства прозрачных изотропных материалов приобретать при деформации способность двойного лучепреломления. Поляризационно-оптический метод можно применять и для изучения непрозрачных объектов, на поверхность которых наносят тонкий слой оптически чувствительного материала. При этом отпадает необходимость в изготовлении модели из дорогого оптически чувствительного материала. Данный метод называют методом оптически чувствительных покрытий. Используемая аппаратура сравнительно проста, но сложность метода связана с выбором толщины покрытия, от которой зависит точность измерения. Аналогичным этому методу является метод хрупких тензочувствительных покрытий, который отличается от него типом используемых материалов и, соответственно, последующей интерпретацией экспериментальных данных. Стоит также упомянуть ультразвуковой метод определения напряжений, который требует специального оборудования.

Принципиально новые возможности в экспериментальной физике открыло использование голографических интерференционных методов измерения, связанных с бесконтактным определением полей перемещений и деформаций поверхности образца или элемента конструкции. Кроме того, голографическая интерферометрия позволила по-новому подойти к использованию традиционных методов и существенно расширить их возможности. Сюда относятся получение и исследование контурных карт объектов неправильной формы, исследование с помощью голографической фотоупругости, а также спекл-интерферометрия и др.

Голографическая интерферометрия – это способ получения и интерпретации интерференционных картин, образованных волновыми фронтами, если, по крайней мере, один из них восстановлен при помощи голограммы. Этот способ позволяет измерить оптическую разность хода интерферирующих волн, которая может быть обусловлена изменением формы и положения исследуемого объекта в пространстве, оптических характеристик среды или объекта, а также длин интерферирующих волн. У этого метода есть свои достоинства и недостатки. К недостаткам можно отнести громоздкость и высокую цену экспериментальных установок, а также относительную сложность интерпретации полученных данных. Привлекателен этот метод возможностью использования широкого диапазона волн, наличием нескольких схем записи голограмм, широким диапазоном решаемых задач и др.

Развитием голографической интерферометрии стала спекл-интерферометрия. Этот метод основан на спекл-эффекте, наблюдаемом оптическими приборами с ограниченной апертурой при отражении когерентной волны от диффузно-отражающей поверхности. При этом чувствительность интерференционных полос к величине и направлению смещения поверхности варьируется в значительно более широких пределах, чем в методах голографической интерферометрии. Кроме того, здесь не требуется очень высокой разрешающей способности регистрирующей среды, понижены требования к механической стабильности элементов и значительно упрощена автоматизированная оценка интерферограмм.

Целесообразность выбора экспериментального метода исследования деформаций зависит от характера решаемых задач: необходимость измерить деформации в отдельных точках (измерение величин деформаций и напряжений локально в наиболее нагруженных местах конструкций) или получить обобщенную картину деформированного состояния. Перечисленные методы решают широкий круг задач: исследование упруго пластических деформаций, изучение процессов разрушения или ползучести, деформация анизотропных

тел, деформация в микрообластях, оценка температурных деформаций и напряжений, изучение динамических процессов, определение остаточных напряжений и др.

Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки. При выборе наиболее эффективного метода для решения конкретных задач исследования деформаций необходимо учитывать сложность проведения эксперимента, условия взаимодействия с исследуемым образцом (контактные или бесконтактные измерения), требования к исследуемому образцу (материал и форма конструкции), чувствительность, точность, пределы измерений, границы погрешностей, объем получаемой информации.

Таким образом, методы физических измерений достаточно разнообразны, быстро изменяются, многие вопросы их применения отражены в публикациях отечественных и зарубежных исследователей. Это связано с тем, что экспериментальные методы играют важную роль при решении задач механики деформируемого твердого тела. В одних случаях они используются для проверки результатов теоретических расчетов или уточнения принятых математических моделей, в других – как единственно возможный способ решения определенных задач. Поэтому публикации о применении методов измерения деформаций требуют практического переосмысления в связи с различием подходов отдельных авторов, противоречивыми экспериментальными данными, отсутствием в некоторых случаях сведений о методах их обработки; многие работы носят иллюстративный характер и не доведены до практического применения.

Вследствие этого в настоящее время особенно **актуальна** разработка новых методов измерения деформаций твердого тела, их сравнение, выявление наиболее эффективных и их оптимизация.

**Предмет исследований** – локализованная пластическая деформация металлов и сплавов и ее количественные исследования с помощью различных вариантов спекл-фотографии и программно-аппаратные решения её применения.

**Цель работы** – разработка автоматической системы анализа спекл-фотографий и автоматизированного оптико-телевизионного комплекса применительно к исследованиям закономерностей локализованной пластической деформации.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

- 1) разработка технических решений по созданию аппаратной части автоматической системы анализа спекл-фотографий с улучшенными относительно аналогов параметрами;
- 2) разработка аппаратной части автоматизированного оптико-телевизионного комплекса;
- 3) разработка алгоритмов обработки электронных спекл-изображений для получения информативных данных о локализованном пластическом течении;
- 4) экспериментальная проверка возможностей разработанного оптико-телевизионного комплекса и сравнение их с методом классической спекл-фотографии.

**Научная новизна** работы

1. Обоснована возможность разделения во времени процессов оптической обработки спекл-фотографий для получения поля векторов смещений точек поверхности деформируемого объекта и анализа получаемых из него расчетным путем пространственно-временных картин распределений компонент тензора пластической дисторсии. Предложенные решения, реализованные в автоматической системе анализа спекл-фотографий, повысили быстродействие и разрешающую способность относительно аналогов.

2. Разработаны конструкция и программное обеспечение автоматизированного оптико-телевизионного комплекса, предназначенного для анализа локализованной пластической деформации металлов, сплавов и неметаллических материалов, с возможностью исследования объектов размерами 1...100 мм. Комплекс позволяет регистрировать цифровые спекл-изображения с частотой до 27 кадров в секунду при пространственном разрешении по смещениям не хуже, чем 1...10 мкм.

3. Использование разработанного комплекса в исследованиях развития локализованной пластической деформации позволило установить не наблюдавшиеся ранее закономерности развития таких процессов. Так, в частности, впервые удалось обнаружить существо-

вание малоамплитудных очагов, рождающихся и эволюционирующих в зонах, расположенных между основными высокоамплитудными очагами. На ряде промышленных сплавов (низкоуглеродистая сталь, дюралюминий) зафиксированы фронты локализованной пластической деформации, перемещающиеся в процессе всей деформации, и показано, что скорость их перемещения линейно убывает с ростом деформирующего напряжения.

### **Практическая значимость**

1. Автоматическая система анализа спекл-фотографий с улучшенными параметрами относительно аналогов позволяет регистрировать зоны локализованной пластической деформации при обработке металлов давлением (прокатка труб из сплавов циркония для ядерных реакторов).

2. Предложена конструкция автоматизированного оптико-телевизионного комплекса с возможностью десятикратного увеличения; получен патент на полезную модель.

3. Лабораторный автоматизированный оптико-телевизионный комплекс используется в ИФПМ СО РАН для исследования закономерностей пластической деформации.

4. В 2010 году установки ALMEC-tv, разработанные с участием автора, изготавливаются по программе «Импортозамещение» СО РАН для Института горного дела СО РАН (Новосибирск) и Института физико-технических проблем Севера СО РАН (Якутск).

**Личный вклад автора** состоит в совместной с научным руководителем постановке задач диссертации, разработке концепции и конструктивных элементов приборов. Автором осуществлена сборка и юстировка приборов, написан один из вариантов программы обработки видеофайлов алгоритмом «вычитания кадров», предложен способ извлечения численной информации. Работы по созданию рабочего программного обеспечения, испытание, организация, проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ полученных данных выполнены коллективом исследователей и инженеров при непосредственном участии автора.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Международной школе-конференции молодых ученых «Физика и химия наноматериалов» Россия, Томск, 13 – 16 декабря 2005 г; XII Международной конференции студентов и молодых ученых “Современные техника и технологии”, Томск, 2006 г; “Mathematics and Computation to support Measurement Quality” Proceedings of the International Seminar, 28 – 30 июня 2006 г. – Saint-Petersburg; IV Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 15 – 18 мая 2007 г; The 9th international symposium on measurement technology and intelligent instrument, 29 June – 2 July, 2009 Saint-Petersburg.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 7 научных работах, в том числе 1 статье в журнале из перечня ВАК, 1 в иностранном журнале. Получен патент на полезную модель.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка использованных источников. Основной текст диссертации изложен на 118 страницах, в 1 таблице и иллюстрирован 38 рисунками, список цитируемой литературы содержит 90 источников.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Технические решения, позволившие увеличить скорость обработки двухэкспозиционных спекл-фотографий в 6...10 раз.

2. Конструкция автоматизированного оптико-телевизионного комплекса, позволяющего визуализировать процесс пластической деформации в реальном времени.

3. Новые данные о кинетике движения фронтов локализованного пластического течения, полученные с помощью оптико-телевизионного комплекса.

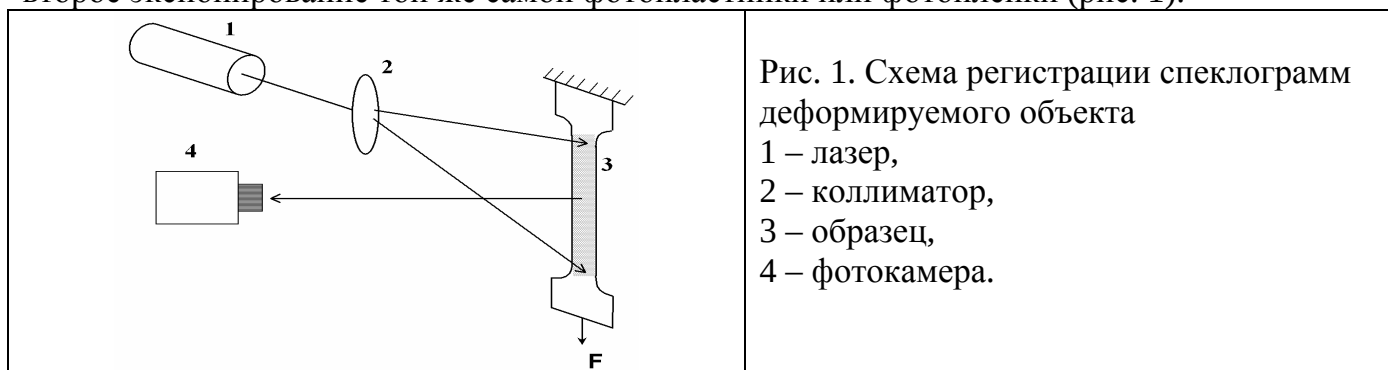
## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во Введении** обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость темы диссертационной работы, определена цель исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Представлена структура диссертации.

**Первый раздел** имеет обзорный характер: в нём рассмотрены основные методы, применяемые для измерения пластической деформации твёрдых тел. В одних случаях они используются для проверки результатов теоретических расчетов или уточнения принятых математических моделей, в других – как единственно возможный способ решения определенных задач. Проведено сопоставление характеристик приведённых методов. Сопоставление характеристик методов позволило сделать вывод, что метод спекл-фотографии является оптимальным для изучения материалов с широкой областью пластической деформации и материалов с нанокристаллической структурой, так как в нём сочетаются точность и возможность бесконтактного измерения деформации. В заключительной части сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования.

**Второй раздел** посвящён описанию основного принципа работы и описанию устройства автоматической системы для анализа спекл-фотографий. Приведены получаемые результаты. Метод двухэкспозиционной спекл-фотографии эффективен для регистрации и анализа полей смещений при активном растяжении, сжатии, изгибе плоских образцов. Он может быть использован также при нагружении в режиме ползучести или при возникновении термических нагрузок. Аппаратура и процедуры измерений во всех случаях идентичны. Исследуемый образец, подвергаемый деформированию на жесткой испытательной машине, освещается расширенным с помощью коллиматора пучком одномодового непрерывного лазера мощностью не менее 50 мВт или импульсного лазера с энергией пучка более 1 Дж и регистрируется длиннофокусной камерой.

Первая экспозиция проводится либо до нагружения, либо после предварительного деформирования до требуемой точки на диаграмме ( $\sigma - \epsilon$ ), например, до предела текучести. Затем производится последующее нагружение так, чтобы перемещение подвижного захвата машины не превышало верхнего предела регистрации смещений 100...200 мкм, и второе экспонирование той же самой фотопластинки или фотопленки (рис. 1).



Так может быть получена последовательная серия двухэкспозиционных спеклограмм, охватывающая требуемый участок диаграммы ( $\sigma - \epsilon$ ) или полностью всю кривую деформации. По окончании съемки фотопластинки подвергаются стандартной химической обработке. Полученные двухэкспозиционные спеклограммы сканируются малоапертурным лазерным пучком для визуализации поля перемещений точек образца за промежуток времени между экспозициями. Оптическая схема расшифровки спеклограмм представлена на рис. 2. Двухэкспозиционное изображение образца необходимо располагать так, чтобы ось растяжения совпадала с осью  $x$ . Спеклограмма (б) на рис. 2 просвечивается, начиная с избранной экспериментатором начальной точки, пучком непрерывного одномодового лазера (7) мощностью  $\leq 10$  мВт.

Этот лазер должен иметь возможно более узкий пучок для обеспечения наивысшей плотности точек сканирования. На экране (8) возникает система полос Юнга, соответствующая усредненным смещениям спеклов по освещаемому световым пучком

участку спеклограммы. Направление вектора смещения спеклов  $\mathbf{r}$ , а следовательно, и соответствующего участка образца нормально к полосам Юнга. Модуль  $\mathbf{r}$  определяется как:

$$|\mathbf{r}| = r = \lambda L / Md. \quad (1)$$

Здесь  $\lambda$  – длина волны освещающего пучка,  $L$  – расстояние между спеклограммой и экраном,  $d$  – шаг полос Юнга на экране (рис. 2)  $M$  – масштаб изображения.

Затем с помощью устройства перемещения спеклограммы в двух взаимно-перпендикулярных направлениях  $x$  и  $y$  (1) последнюю нужно перевести в следующую точку и так произвести сканирование всего изображения образца с требуемым шагом. Так как направление перемещения нормально к полосам Юнга, то для вычисления вектора  $\mathbf{r}$  достаточно измерять расстояние между полосами (шаг)  $d$  и угол  $\theta$  между ними и осью  $\eta$ . Это дает возможность определить продольную и поперечную компоненты вектора  $\mathbf{r}$  как

$$u = r \cos \theta = (\lambda L \cos \theta) / Md, \quad v = r \sin \theta = (\lambda L \sin \theta) / Md. \quad (2)$$

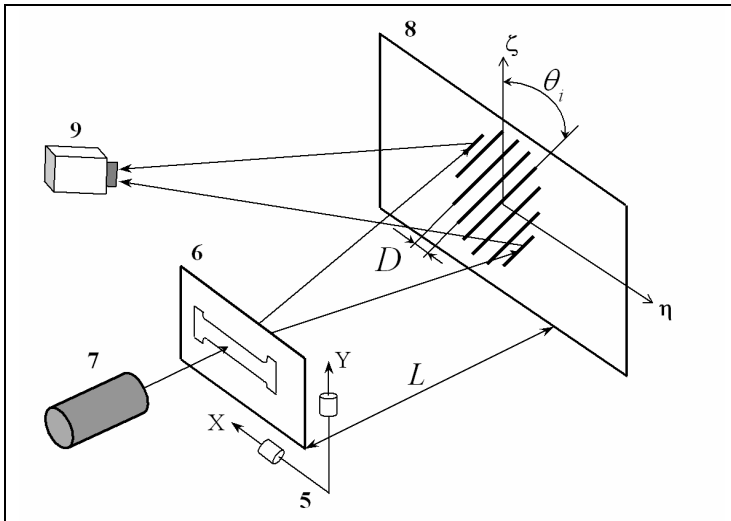


Рис. 2. Оптическая схема расшифровки спекл-фотографий

- 5 – микроподвижный столик;
- 6 – спекл-фотография;
- 7 – лазер;
- 8 – экран;
- 9 – видеокамера.

Для получения адекватных результатов устройство перемещения должно обеспечивать позиционирование последующих спеклограмм в ту же, ранее избранную начальную точку, поэтому последнюю нужно выбирать так, чтобы она не двигалась в процессе эксперимента. Например, эта точка должна располагаться вблизи неподвижного захвата нагружающего устройства, где исследуемые перемещения пренебрежимо малы.

Исследования пластичных материалов, обладающих широкой областью пластической деформации, требуют использования спекл-фотографии в течение длительного периода нагружения, т. е. количество спекл-фотографий может достичь нескольких сотен для одного образца. Это предъявляет жёсткие требования к производительности экспериментальной установки. В связи с этим была проведена модернизация метода исследований, в результате которой были найдены технические решения, позволяющие в 6...10 раз увеличить скорость сканирования спекл-фотографий и в четыре раза повысить точность и пространственное разрешение.

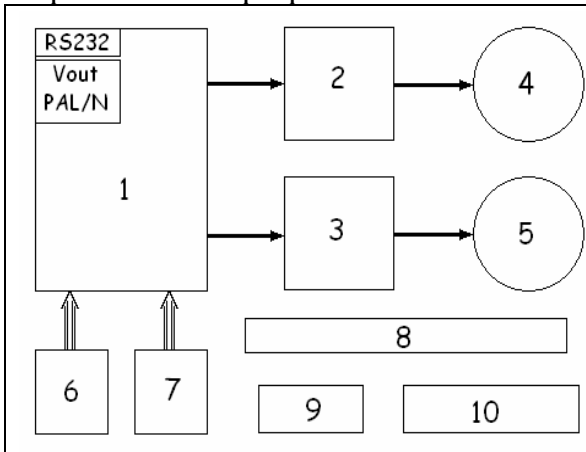


Рис. 3. Блок-схема прибора

- 1 – контроллер, управляющий узлами системы;
- 2 и 3 – контроллеры шаговых двигателей;
- 4 и 5 – шаговые двигатели, обеспечивающие движение по двум перпендикулярным направлениям;
- 6 – видеокамера, фиксирующая информацию о местоположении спеклограммы (для позиционирования);
- 7 – видеокамера, регистрирующая интерференционную картину;
- 8 – гелий-неоновый лазер для сканирования спеклограмм (создаёт интерференционную картину);
- 9 – блок питания лазера;
- 10 – блок питания для узлов 1 – 7.



Основное отличие от предыдущих моделей заключается в том, что само сканирование и расшифровка (извлечение информации) были отделены друг от друга; это стало возможно благодаря появлению компьютеров с большей производительностью. Таким образом, автоматическая система для расшифровки спекл-фотографий состоит из двух частей: программно-аппаратной части и программы расшифровки. Программно-аппаратная часть – это прибор, управляемый компьютером (рис. 3).

На рис. 4 представлена схема работы прибора. Зеркало 2 отражает лазерное излучение на фотопластинку 1, установленную на предметном столике. Перемещение предметного столика осуществляется с помощью шаговых двигателей 4 и 5.

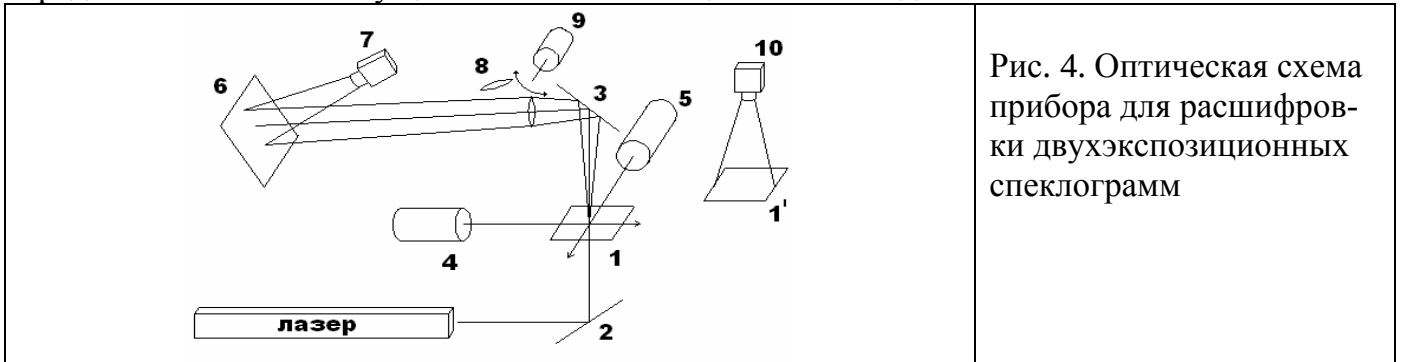


Рис. 4. Оптическая схема прибора для расшифровки двухэкспозиционных спеклограмм

Дифрагированной спекл-фотографией 1 световой пучок падает на зеркало 3, отражающее его на экран 6 в поле зрения камеры 7; экран располагается перпендикулярно оптической оси камеры 7. Для уменьшения размеров изображения полос Юнга, проецируемых на экран (при слишком редком шаге полос), длиннофокусная линза 8 помещается в оптический тракт с помощью двигателя 9. Перед началом сканирования, для определения точного местоположения спеклограмм, с помощью шаговых двигателей фотопластинка перемещается в поле зрения камеры 10 (позиция 1<sup>1</sup>). Под фотопластинкой в позиции 1<sup>1</sup> располагается равномерно освещенный экран. Камера 10 передает изображение фотопластинки на плату видео захвата – и на экран монитора.

Оператор на компьютере выделяет области, подлежащие сканированию, и даёт команду о начале сканирования, прибор сканирует спеклограмму 1 пучком лазерного излучения – на экране 6 формируется картина интерференционных полос (полос Юнга), фиксируемых видеокамерой 7. Видеосигнал, поступающий с видеокамеры 7, передается на плату видеозахвата компьютера и сохраняется в виде файла в базе данных. Процесс управления осуществляется через последовательный порт (блок схема программы управления на рис. 5). Расшифровка полученных данных производится независимо от процесса сканирования на любом компьютере, работающем под управлением операционной системы Windows.

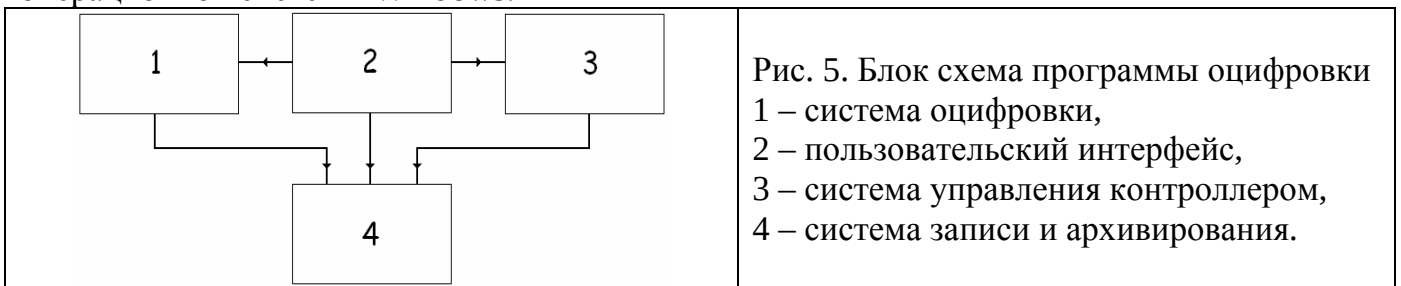


Рис. 5. Блок схема программы оцифровки  
1 – система оцифровки,  
2 – пользовательский интерфейс,  
3 – система управления контроллером,  
4 – система записи и архивирования.

Технические характеристики прибора: габаритные размеры – 700×650×500 мм; область сканирования – 120×90 мм; фотопластинка – 120×90 мм; быстродействие – 2 измерения в секунду; точность позиционирования при сканировании – 25 мкм.

Одной из первых спекл-фотографий, обработанных разработанным прибором, стала спекл-фотография ионного кристалла LiF (рис. 6). Для получения спекл-фотографии одна грань образца обрабатывалась наждачной бумагой до матовой поверхности.

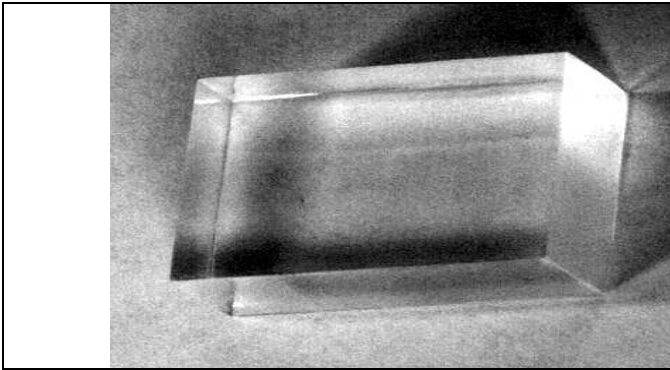


Рис. 6.  
Ионный кристалл LiF 40×25×10

После программной обработки результаты представляются в виде диаграммы (рис. 7),  $\epsilon_{xx}$  – величина деформации. Таким образом, из диаграммы с высокой точностью получаем величину деформации и координату с временной привязкой. Таким образом, в рамках диссертационной работы разработан и изготовлен компактный прибор, обладающий более высокой точностью и сокращающий время обработки результатов от 6 до 10 раз по сравнению с аналогами.

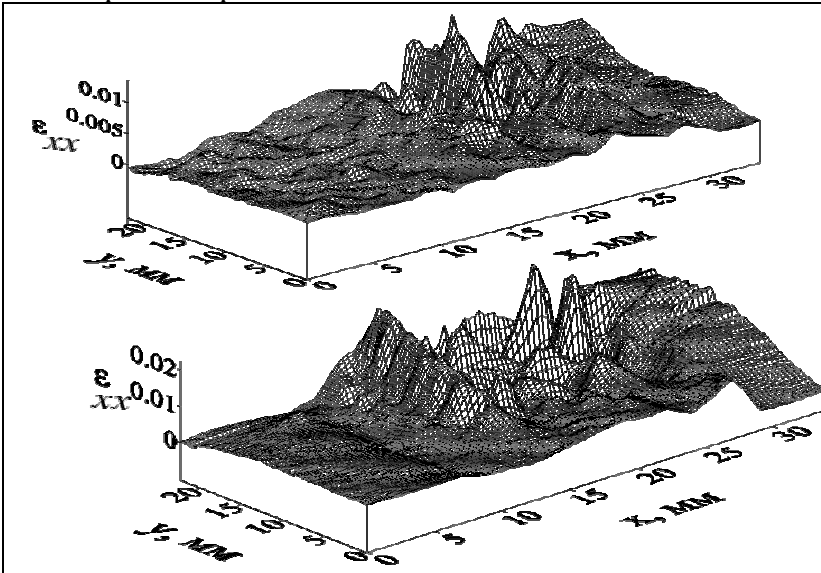


Рис. 7.  
Диаграмма положений максимумов локальных деформаций для LiF после 1,4% деформации сверху и 3,2% деформации снизу.

Третий раздел посвящён описанию основного принципа работы и устройства автоматизированного оптико-телевизионного комплекса для визуализации локализованной пластической деформации. Приведены получаемые результаты. Принцип работы автоматизированного оптико-телевизионного комплекса заключается в компьютерном анализе оптических изображений микрорельефа поверхности исследуемого материала, находящегося под нагрузкой. Система состоит из телевизионной (фото) камеры, оптического микроскопа, устройства освещения, специализированных аппаратных интерфейсов, персонального (портативного) компьютера и программного обеспечения для анализа изображений и визуализации результатов. Система монтируется на испытательной машине. Программное обеспечение автоматизированного оптико-телевизионного комплекса (в основе принципа действия которого лежит методология физической мезомеханики) позволяет выявлять области локализации пластической деформации. Метод электронной спекл-фотографии позволяет визуально наблюдать изменения, происходящие на поверхности образца во время выполнения эксперимента. Соответственно, получаем возможность отслеживать кинетику процессов локализации во время эксперимента. Автоматизированный оптико-телевизионный комплекс состоит из двух частей: основной, программно-аппаратной части и совокупности различных программ обработки и способов получения данных. Программно-аппаратная часть – это прибор, управляемый компьютером (рис. 8).

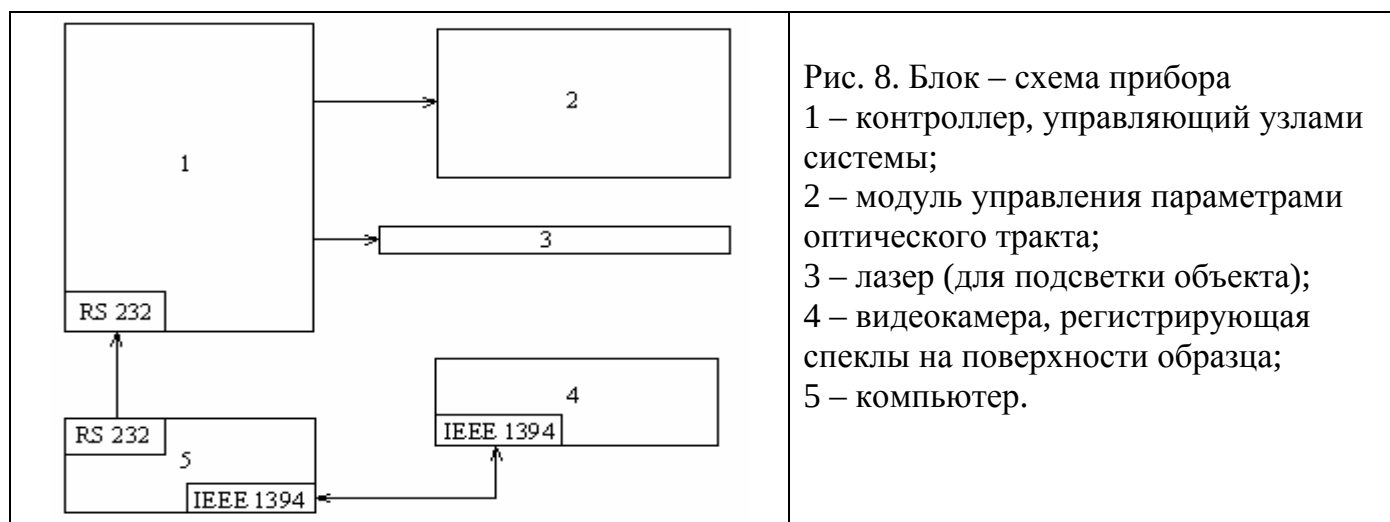


Рис. 8. Блок – схема прибора  
 1 – контроллер, управляющий узлами системы;  
 2 – модуль управления параметрами оптического тракта;  
 3 – лазер (для подсветки объекта);  
 4 – видеокамера, регистрирующая спеклы на поверхности образца;  
 5 – компьютер.

В основу метода положен принцип, аналогичный принципу классической спекл-фотографии: объект освещается рассеянным пучком когерентного излучения, на поверхности объекта получаем спекл-картину, в которой спеклы “привязаны” к поверхности. При деформации спеклы меняют своё положение вместе с деформацией на поверхности объекта, а видеокамера, в свою очередь, регистрирует эти изменения (кадр за кадром). Таким образом, отличия в соседних кадрах показывают, что на поверхности объекта произошли изменения за время между кадрами.

Рассмотрим схему прибора (рис. 9). Объект, расположенный перед прибором, освещается источником когерентного излучения (гелий-неоновый лазер (3)), объектив служит для создания равномерной подсветки объекта, модуль управления параметрами оптического тракта (2) изменяет размер диафрагмы и обеспечивает увеличение и фокусировку в широком диапазоне (положение максимального увеличения показано пунктирными линиями, возможно десятикратное увеличение).

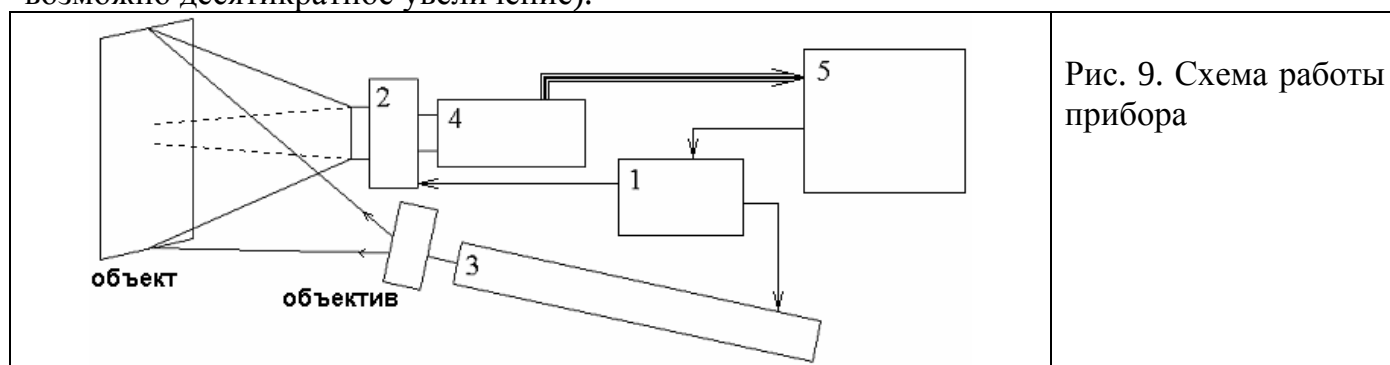


Рис. 9. Схема работы прибора

Цифровая камера (4) передает информацию через кабель IEEE 1394 на компьютер, далее информация выводится прямо на экран монитора, либо выводится обработанный результат, при этом возможно сохранение информации как видеопотока или как набор фотографий в формате (BMP), частота съёмки зависит от условий эксперимента и формата сохранения данных. Управление прибором осуществляется компьютером, работающим под управлением операционной системы Windows, через последовательный порт.



Рис. 10. Внешний вид прибора. Габаритные размеры: 670×180×170 мм

Прибор обладает десятикратным увеличением, возможна работа с объектами от 1 мм до 100 мм длиной. Максимальная скорость съёмки – 27 кадров в секунду с разрешением 1280×1024.

Параметры оптического тракта настраиваются перед началом эксперимента: увеличение и размер диафрагмы, настройка параметров цифровой камеры (экспозиция, частота съёмки, цифровое усиление сигнала (яркость) и область полезной информации). В процессе работы можно управлять параметрами.

Измерения шума цифровой камеры проводилось раз в секунду в отдельно взятом пикселе в течение двух минут. В первом случае использовалась светодиодная подсветка, как наиболее стабильная из доступных источников освещения, а во втором – лазерная подсветка по рабочей схеме.

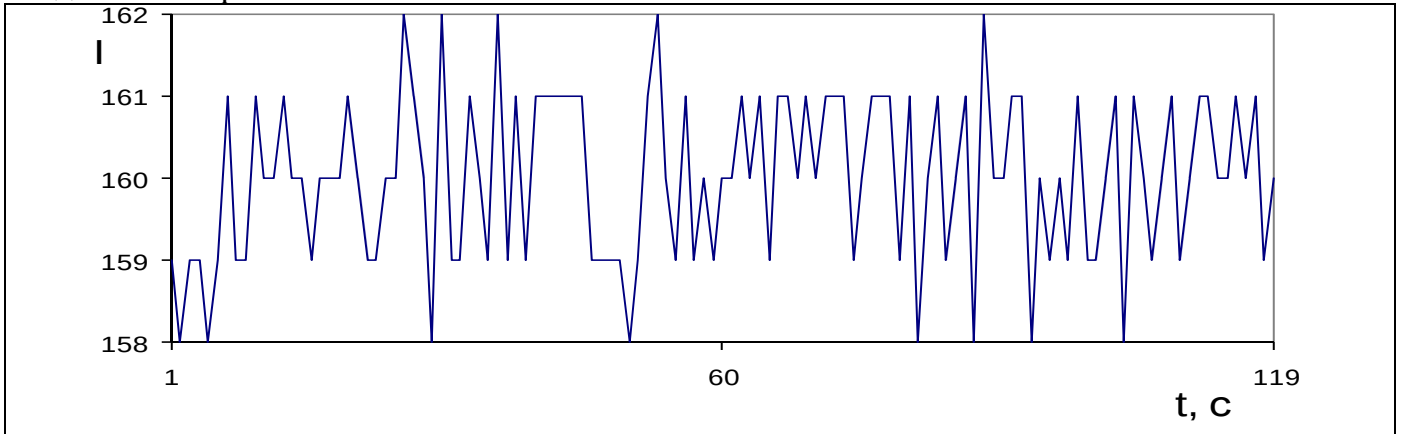


Рис. 11 а. Зависимость изменения яркости, в отдельно взятом пикселе, от времени, при освещении неподвижного объекта светодиодной подсветкой.

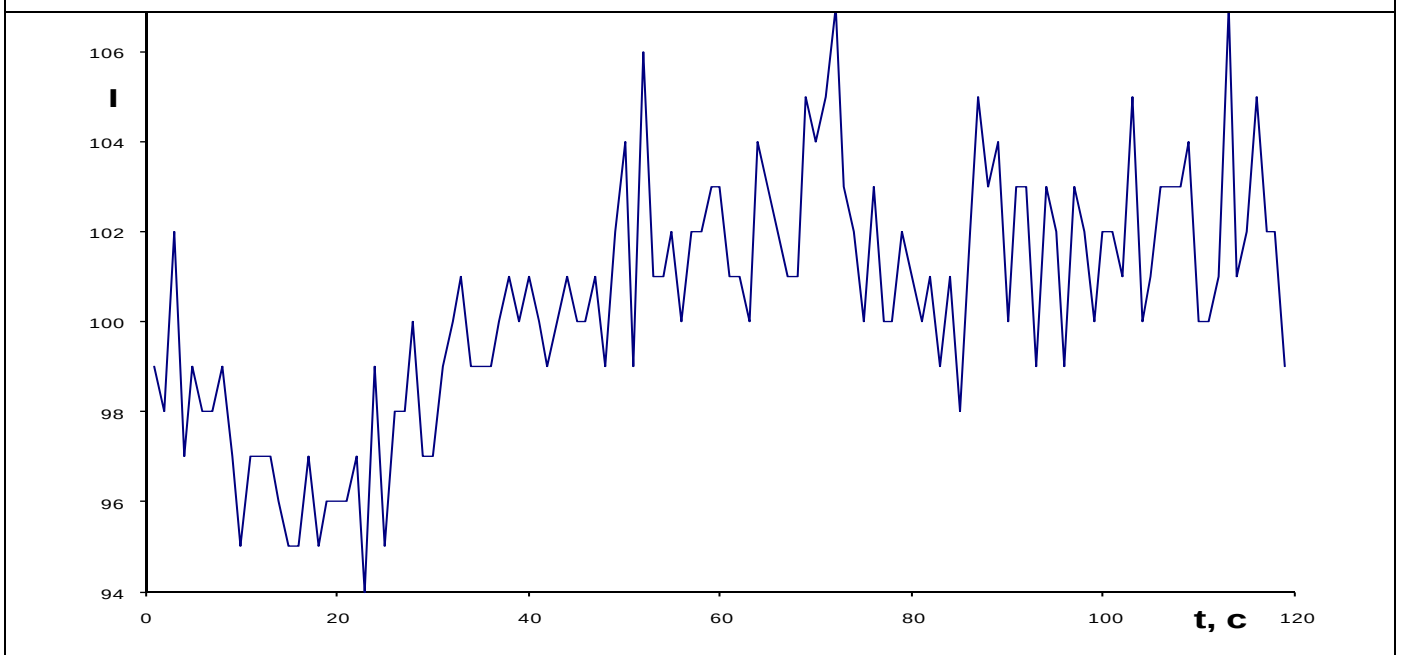


Рис. 11 б. Зависимость изменения яркости, в отдельно взятом пикселе, от времени, при освещении неподвижного объекта лазерным излучением.

При анализе полученных результатов (рис. 11) выяснилось, что наравне с помехами самой матрицы имеет место и временная нестабильность лазерного излучения. Далее была проведена оценка максимальной суммарной ошибки, вносимой шумом матрицы и нестабильностью лазерного излучения. Так, было установлено, что максимальный скачок между измерениями за 1с (рис. 11 б) составляет 7 от 256 – общее количество градаций яркости, в итоге получаем ~2,7%, при более чем двадцатикратном увеличении времени

между кадрами ошибка возрастёт в два раза. Следовательно, в программах обработки необходимо предусмотреть функцию, позволяющую отсеивать данную ошибку.

Возможны различные подходы к обработке информации, получаемой с помощью прибора. Одной из первых программ обработки, написанных в лаборатории, стала программа “вычитания кадров”, основывающаяся на яркостном вычитании двух соседних кадров (из предыдущего вычитается последующий кадр). В итоге сохраняются изменения расположения спеклов на поверхности (рис. 12), скопления светлых точек показывают области локализации деформации на поверхности образца.

Результат можно сохранить как видеофайл, причем получается наглядная и эффектная визуализация локализации пластической деформации. Возможно извлечение численных данных – координаты положения полос локализованной деформации, а значит, и скорости. Точность определения центра области локализованной деформации  $\pm 4$  пикселя ( $\pm 0,25$  мм в данном случае), что составляет 1% от общего количества пикселей, в данном эксперименте на длину образца пришлось 800 пикселей.

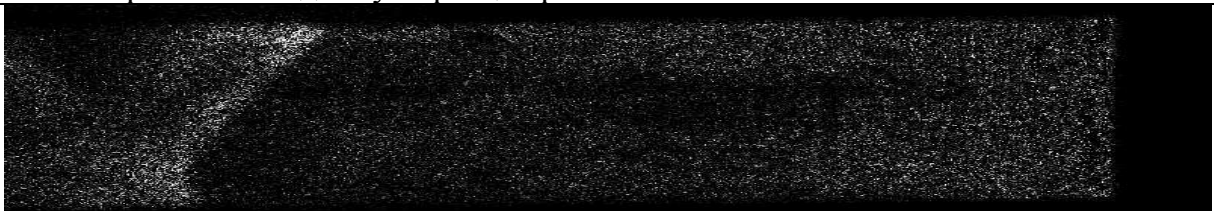


Рис. 12 а. Результат обработки спекл-изображений

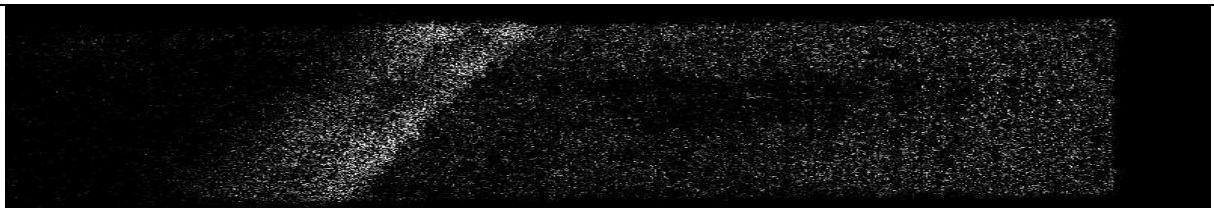


Рис. 12 б. Результат обработки спекл-изображений

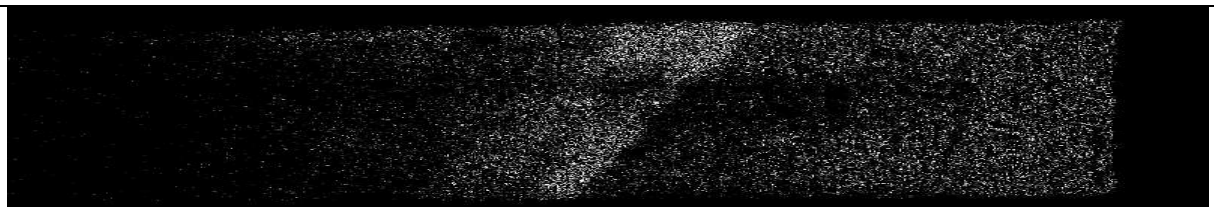


Рис. 12 в. Результат обработки спекл-изображений

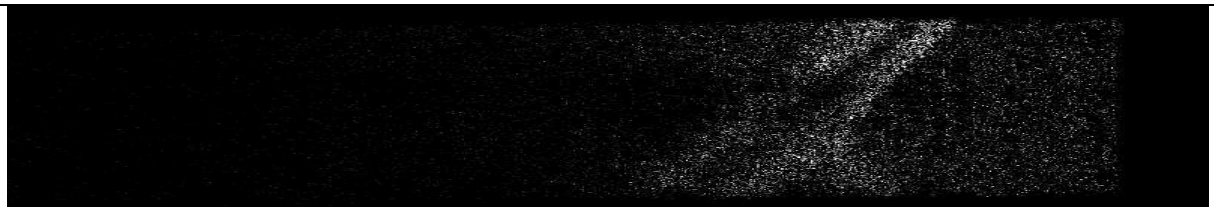


Рис. 12 г. Результат обработки спекл-изображений



Рис. 12 д. Результат обработки спекл-изображений

Следующий шаг – разработка программы, алгоритм которой заключается в использовании статистики первого ранга спекл-структуры для оценки локальных скоростей поверхности. Скорость любой точки для случая диффузно-пропускающего объекта может быть вычислена как:

$$v = \frac{2w}{T} \frac{\langle I \rangle^2}{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}, \quad (3)$$

где  $w$  – радиус пучка лазера,  $T$  – интервал измерения,  $I$  – яркость в точке измерения и  $\sigma^2 = \langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2$ . Из чего следует, что эта скорость обратно пропорциональна среднеквадратической дисперсии яркости и прямо пропорциональна квадрату средней яркости в точке измерения за период времени  $T$ .

Во время эксперимента образец перемещался без деформации с различными скоростями с целью выяснения зависимости  $F_v = \sigma^2 / \langle I \rangle^2$  от скорости перемещения поверхности. При этом расчеты производились для каждой точки изображения на выборке длительностью 1,7 с, а затем вычисляли среднее значение по площади образца. Результаты измерения представлены на (рис. 13).

Обращает на себя внимание излом линейной зависимости в области скоростей перемещения 1,3 мм/мин, который можно объяснить тем, что в схеме эксперимента размер одного светочувствительного элемента матрицы цифровой камеры равен 39 мкм; такое расстояние может быть пройдено точкой поверхности за период измерения 1,7 сек, если последняя движется со скоростью  $> 1,3$  мм/мин. Таким образом, можно определить предельную измеряемую скорость для другого интервала измерения или определить требуемый интервал, задавшись максимальной скоростью поверхности в области измерений. Так, представилось возможным визуализировать поля деформации с использованием значений функции  $F_v = \sigma^2 / \langle I \rangle^2$ , нормированных на диапазон отображающего устройства, либо пересчетом этих значений в локальные скорости по калибровочному графику (рис. 13) с последующим интегрированием по времени и дифференцированием по координатам.

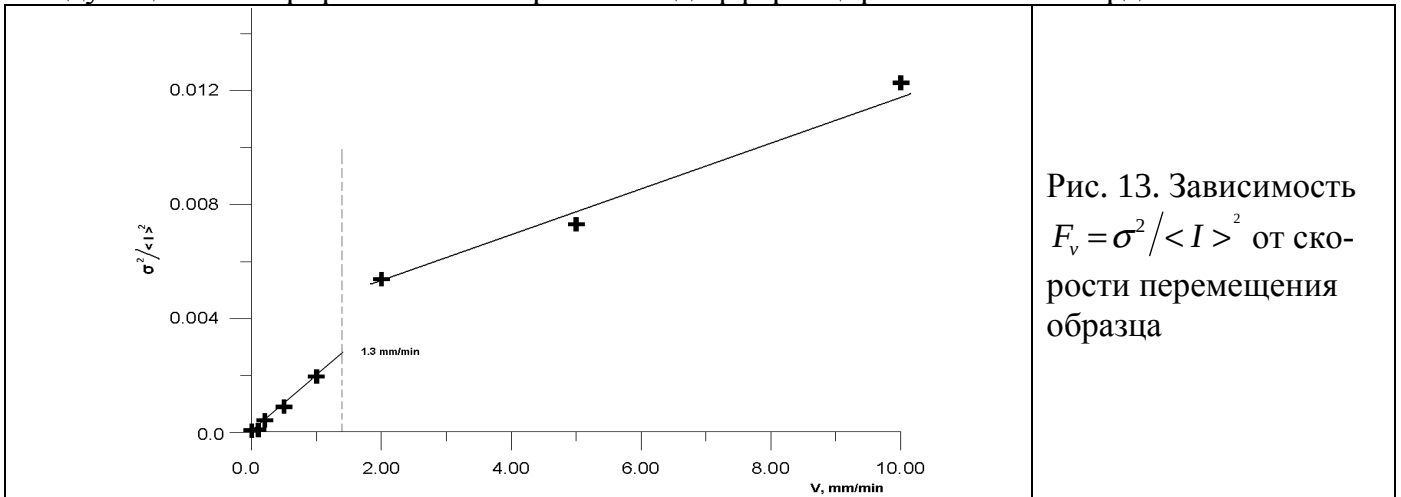


Рис. 13. Зависимость  $F_v = \sigma^2 / \langle I \rangle^2$  от скорости перемещения образца

Применение цифрового метода, описанного выше, позволяет получать изображения локализации деформации с высоким пространственно-временным разрешением (до 0,03 мм и  $1 \text{ с}^{-1}$ , против 1 мм и  $1/30 \text{ с}^{-1}$  для обычной спекл-фотографии), а значит, и повысить точность при измерении требуемых параметров локализованной деформации. На рис. 14 показан фрагмент из серии последовательных картин деформации, на которых символами А, В, С обозначены положения областей локализованной деформации в образце. Результаты экспериментальных исследований показали, что в случае анализа спекл-поля диффузно-отражающего объекта измеренная скорость перемещения точки поверхности оказывается прямо пропорциональной дисперсии яркости в интервале измерения.

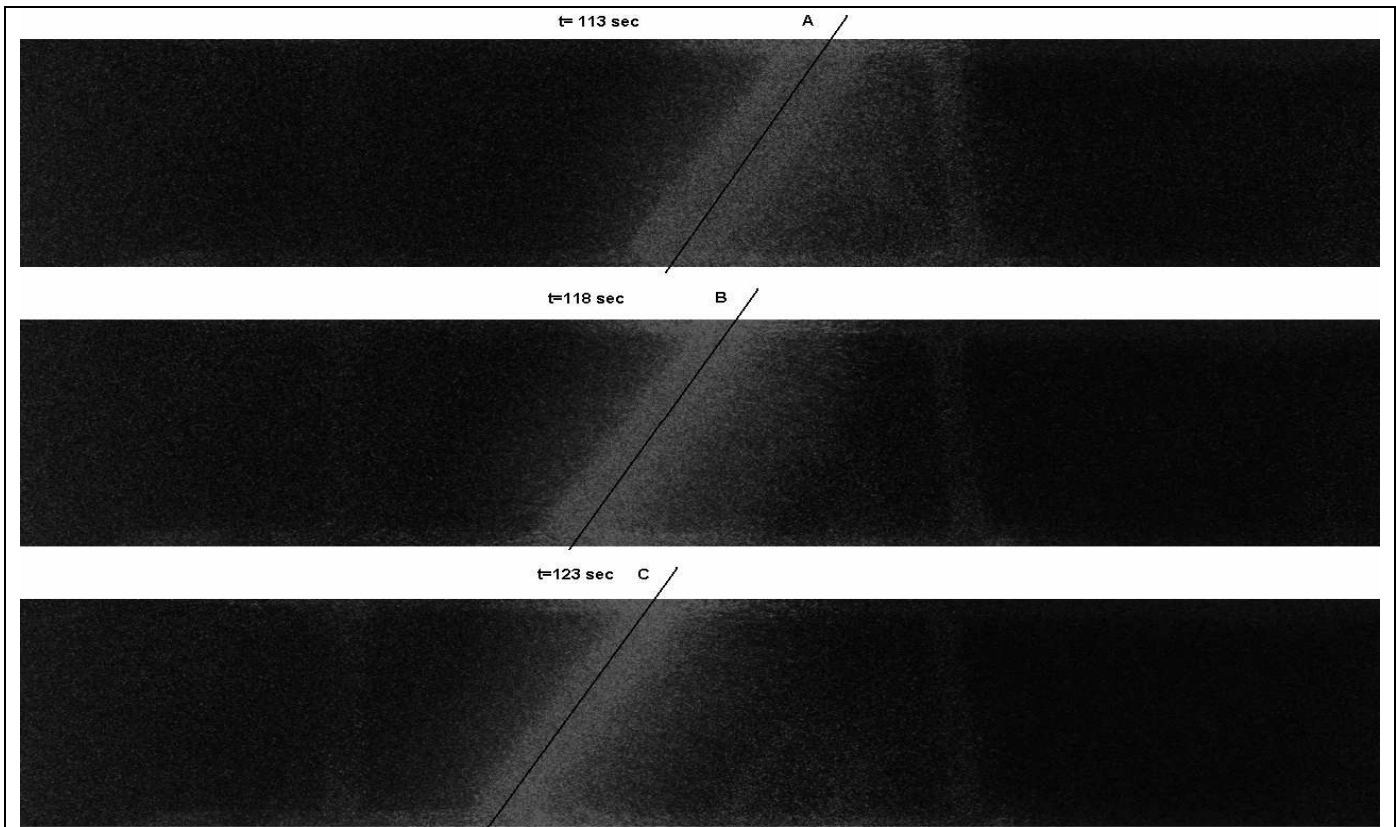


Рис. 14. Карты локализации пластической деформации в образце, полученные с помощью вычисления  $F_v = \sigma^2 / \langle I \rangle^2$

Сравнение разработанного прибора с аналогичной по решаемым задачам цифровой оптической системой для анализа полей деформаций LIMESS Vic-3D показало преимущества разработанного прибора в точности и быстродействии.

**Четвёртый раздел** посвящён сопоставлению данных, полученных при совместном использовании метода классической спекл-фотографии и метода электронной спекл-фотографии на стали 09Г2С, и анализу данных, полученных и на сплаве Д1.

Эксперимент на стали 09Г2С проводился с использованием двух методов. С одной стороны образца – методом классической спекл-фотографии с применением автоматизированной системы для расшифровки двойных спекл-изображений; и с другой стороны образца – методом электронной спекл-фотографии с применением автоматизированного оптико-телевизионный комплекса.

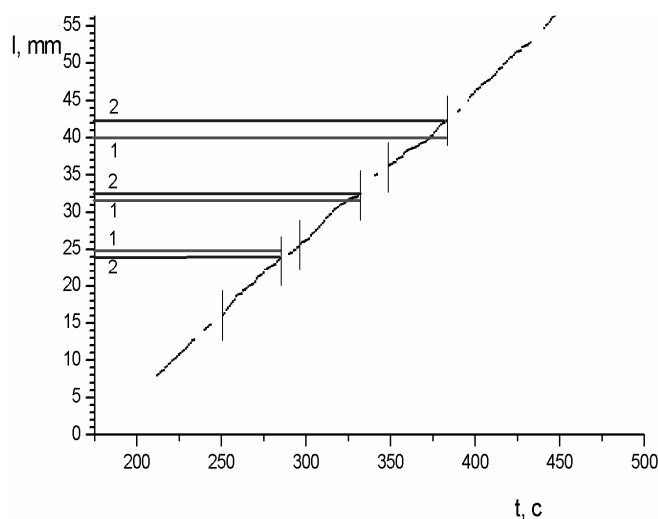


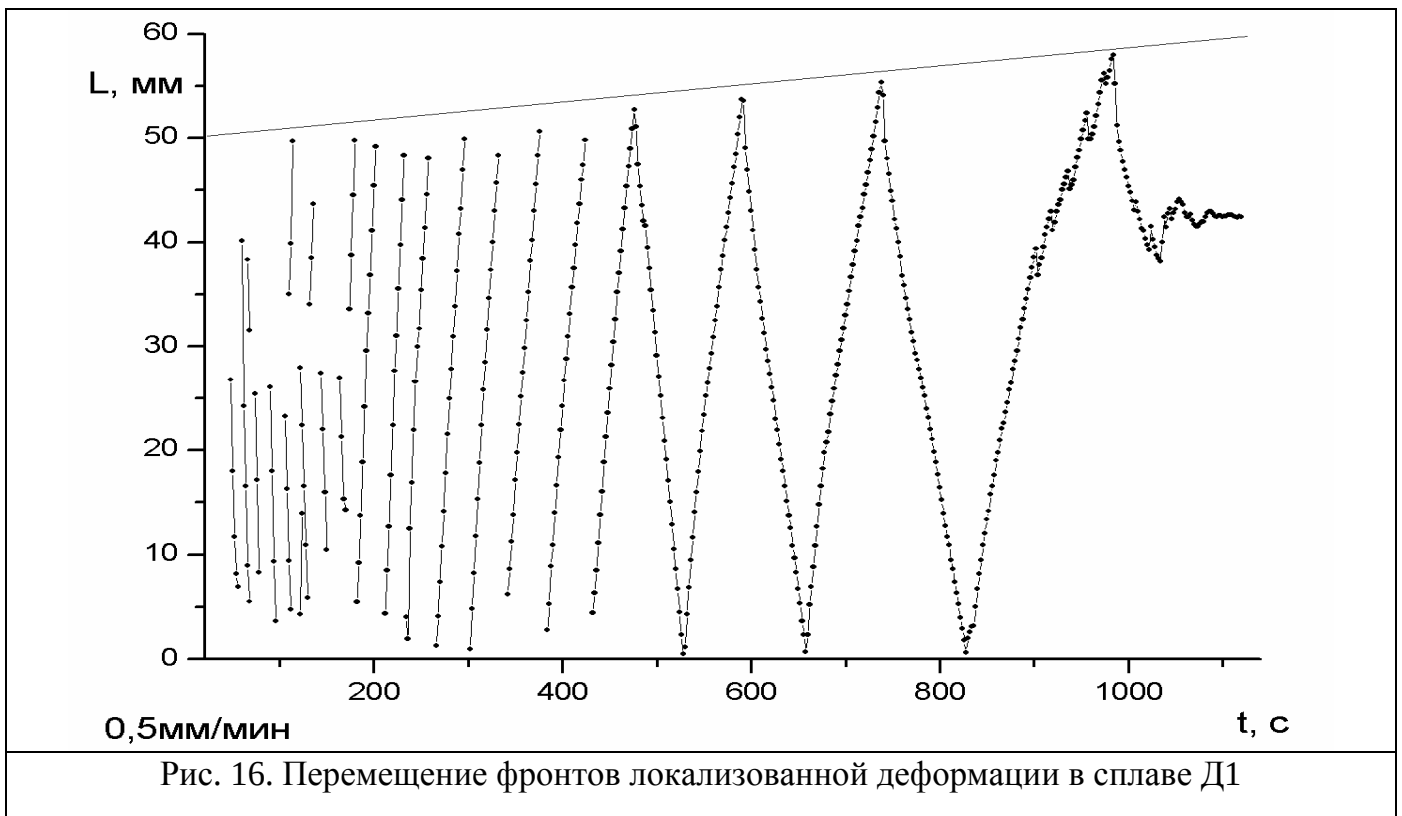
Рис. 15. Зависимость перемещения полосы Чернова – Людерса по длине образца от времени деформации, построенная по данным электронной спекл-фотографии, сталь 09Г2С (площадка текучести).  
1 – положение полосы Чернова – Людерса на фотопластинке (классическая спекл-фотография),  
2 – положение полосы Чернова – Людерса (электронная спекл-фотография).

По данным электронной спекл-фотографии построен график перемещения полосы Чернова – Людерса от времени деформации (рис. 15) (обработка данных выполнена программой “вычитания кадров”), на график нанесено положение полосы Чернова – Людерса, регистрируемое методом классической спекл-фотографии.

При сопоставлении результатов, которые были получены двумя методами (рис. 15), имеем факт оптимального совпадения. Это говорит о том, что оптико-телевизионный комплекс позволяет не только получать наглядную и эффектную визуализацию локализации пластической деформации, но и с хорошей точностью получать численные данные о локализованной деформации.

При проведении исследований (с помощью метода электронной стекл-фотографии) на сплаве Д1 с использованием автоматизированного оптико-телевизионного комплекса зарегистрированы области локализованной деформации, перемещающиеся по длине всего образца. Визуально области локализованной деформации, обнаруженные на сплаве Д1, имеют сходство с полосой Чернова – Людерса, сходный угол наклона около  $60^\circ$ , однако скорости перемещения полос, обнаруженных на сплаве Д1, много больше, и их перемещение по рабочей области образца происходит в процессе всей пластической деформации. Далее приведен график кинетики (рис. 16).

В верхней части рис. 16 проведена прямая, показывающая удлинение рабочей области образца. На графике положение неподвижного захвата снизу. Перемещение фронта локализованной деформации по длине образца происходит достаточно равномерно, при этом скорость, которую можно определить по наклону траекторий ( $v = \Delta X / \Delta t$ ), монотонно убывает с ростом общей деформации. В процессе исследования, установлено, что движение фронтов прекращается к моменту образования шейки и разрушения образца, образец разрывается в месте остановки фронта.



При этом скорость связана линейной зависимостью с напряжением, как видно из следующего графика (рис. 17). Из графиков можно сделать вывод, что чем выше степень упрочнения образца, тем медленнее происходит процесс перемещения области локализованной деформации.



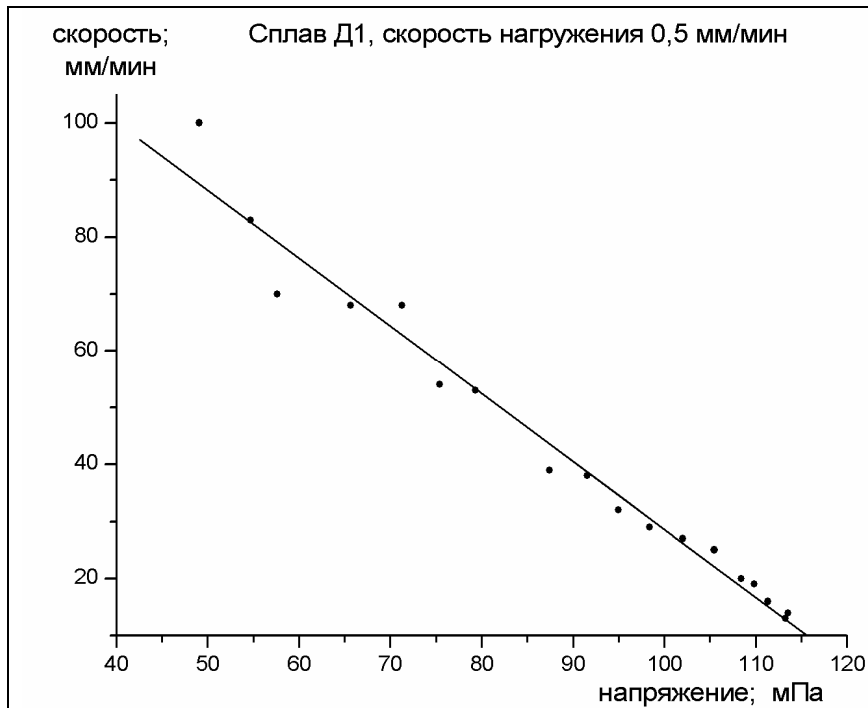


Рис. 17. Зависимость скорости перемещения фронтов локализованной деформации от напряжения.

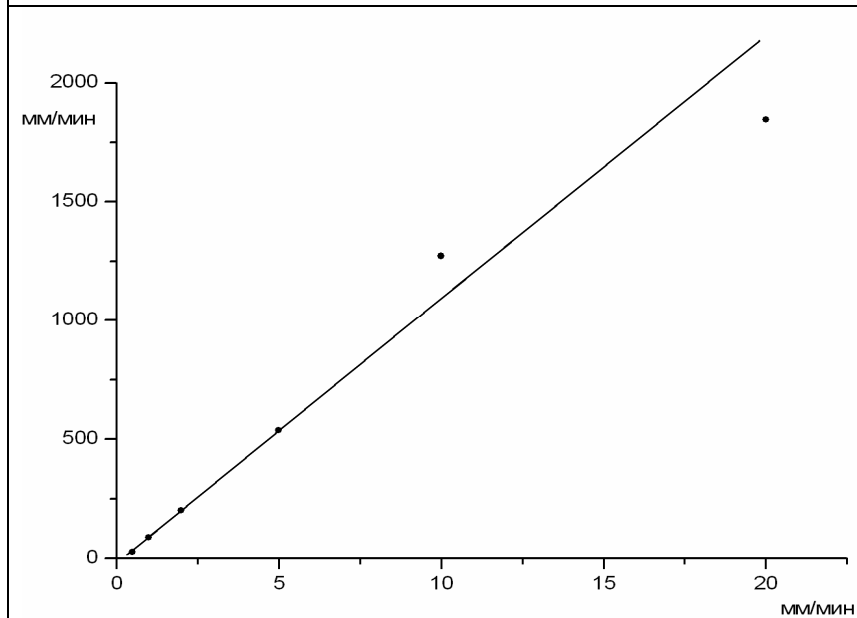


Рис. 18. Зависимость скорости движения фронтов локализованной деформации от скорости подвижного захвата.

Следующая серия экспериментов выполнена с целью выяснения влияния скорости растяжения на поведение областей локализованной деформации. Измерение скорости проводились на 8% деформации, на скоростях растяжения, начиная от 0,5 мм/мин и заканчивая 20 мм/мин (рис. 18).

Линейная зависимость на рис. 18 говорит о том, что увеличение скорости протекания процесса деформации не влияет на физику самого процесса, в интервале исследуемых скоростей. Также очень интересным является сам факт того, что скорость перемещения областей локализованной деформации на два порядка больше скорости самой деформации. Это свидетельствует о том, что метод электронной спекл-фотографии необходим для исследования закономерностей пластической деформации.

Подводя итоги всей совокупности результатов настоящего диссертационного исследования, можно сделать вывод, что метод электронной спекл-фотографии является эффективным инструментом для исследования пластической деформации. При сравнительно несложной реализации он позволяет существенно увеличить информативность исследования пластических процессов по сравнению с традиционной спекл-фотографией. Полученные результаты подтверждают работоспособность методики и её применимость в исследовании

ях пластической деформации. Методика цифровой спекл-фотографии позволила зарегистрировать процессы, протекающие на скоростях, не охватываемых классической спекл-фотографией, и описать кинетику протекания этих процессов. Зарегистрированы новые формы очагов локализации деформации в сплаве Д1, перемещающихся по длине образца в течение всей деформации. Технические характеристики экспериментальной установки могут быть существенно улучшены при применении более совершенных цифровых камер и высокопроизводительных компьютеров.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

1. Создан автоматический малогабаритный прибор, предназначенный для расшифровки спекл-фотографий, получаемых при регистрации полей смещений в режимах активного нагружения и ползучести, по схемам растяжения, сжатия и изгиба плоских образцов. Производительность прибора при сканировании спекл-фотографий увеличена до 2 точек в секунду, что в 6...10 раз выше по сравнению с ранее использованными для этих целей приборами.

2. Разработан автоматизированный оптико-телевизионный комплекс для компьютерного анализа поля векторов смещения при деформации по оптическим изображениям микрорельефа поверхности деформируемого материала. Комплекс позволяет визуализировать процесс пластической деформации в реальном времени и с достаточной информативностью исследовать объекты размерами 1...100 мм.

3. С помощью автоматизированного оптико-телевизионного комплекса исследованы особенности развития зон локализации пластического течения в металлах, сплавах и неметаллических кристаллах и установлено, что

- при пластической деформации сплава Д1 зарегистрированы области локализованной деформации, перемещающиеся по образцу в процессе всей деформации, определены скорости движения областей, построены графики зависимостей кинетики движения;
- скорость движения областей, зарегистрированных на сплаве Д1, прямо пропорциональна напряжению при деформации;
- скорость движения областей, зарегистрированных на сплаве Д1, прямо пропорциональна скорости деформации.

### **Основные публикации автора по теме диссертации:**

1. Данилов В.И., Зуев Л.Б., Горбатенко В.В., Гончиков К.В., Павличев К.В. Использование спекл-интерферометрии для исследования локализации пластической деформации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72, № 12. – С. 40 – 45.

2. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. Alternative speckle photography techniques for plastic deformation investigation // Proceedings of the 9-th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instrument. Saint-Petersburg, 29.06.09 – 02.07.09. – SPb., 2009. – Vol. 4. – P. 302 – 306.

3. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses // Measurement Science and Technology. – 2010. – Vol. 21, № 5. – P. 1 – 5.

4. Павличев К.В. Использование способа спекл-фотографии для исследования высокопластичных материалов // Физика и химия наноматериалов : сборник материалов международной школы-конференции молодых учёных. – Томск, 2005. – С. 213 – 216.

5. Зуев Л.Б., Горбатенко В.В., Павличев К.В. Автоматизированная система, предназначенная для расшифровки двойных спекл-изображений // Современная техника и

технологии : XII международная научно – практическая конференция студентов и молодых учёных. – Томск, 2006. – С. 109 – 110.

6. Bolotina I.O., Danilov V.I., Pavlichev K.V., Zagumenyi A.A. Apparatus and Mathematical Support of the Speckle Interferometry Method for Investigation of Plastic Deformation Localization // Mathematics, Statistics and Computation to Support Measurement Quality : proceedings of the International Seminar. Saint-Petersburg, 28.06.06 – 30.06.06. – SPb., 2006. – P. 70 – 73.

7. Павличев К.В. Автоматизированная система, предназначенная для визуализации локализации пластической деформации // Перспективы развития фундаментальных наук : IV Международная конференция студентов и молодых ученых. 15 – 18 мая 2007 г. – Томск, 2007. – С. 78 – 80.

8. Павличев К.В. Оптико-телевизионное устройство отображения зон локализации деформации поверхности : Патент на полезную модель РФ № 78565. – Оpubл. БИПМ 27.11.2008.

Тираж 100 экз.  
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»  
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а