

ЭЛЕКТРОННАЯ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ

Дмитрий Борисович Крюков, канд. техн. наук, dabbkk@yandex.ru

Пензенский государственный университет, г. Пенза Россия

Аннотация. Представлен аналитический обзор метода электронной спекл-интерферометрии в его современном состоянии. Рассмотрены физические основы метода, его ключевые отличия от классической интерферометрии, а также основные схемы реализации (включая сдвиговую интерферометрию - шерографию) и алгоритмы обработки данных. Приводятся результаты анализа использования метода электронной спекл-интерферометрии в науке, промышленности, аэрокосмической отрасли и др., на основе чего делается вывод о стратегических направлениях развития данного метода неразрушающего контроля на ближайшую перспективу. Описана интеграция метода электронной спекл-интерферометрии с искусственным интеллектом, в многоканальных и гибридных системах, а также его применение для специализированных решений в критически важных областях.

Ключевые слова: электронная спекл-интерферометрия, шерография, неразрушающий контроль, поле деформаций, цифровая обработка спекл-интерферограмм

ELECTRON SPECKLE INTERFEROMETRY, CURRENT STATE OF THE ART, TECHNOLOGICAL CHALLENGES

Dmitrii B. Kryukov

Penza State University, Penza, Russia

Abstract. This article presents an analytical review of the current state of electron speckle interferometry. It examines the physical foundations of the method, its key differences from classical interferometry, as well as its main implementation schemes (including shearing interferometry-shearography) and data processing algorithms. The article presents the results of an analysis of the use of the electronic speckle interferometry method in science, industry, the aerospace industry, etc., on the basis of which a conclusion is drawn about the strategic directions for the development of this non-destructive testing method in the near future. The integration of the electronic speckle interferometry method with artificial intelligence in multichannel and hybrid systems, as well as its application for specialized solutions in critical areas, is described.

Keywords: electronic speckle interferometry, shearography, non-destructive testing, deformation field, digital processing of speckle interferograms

В современном инженерном мире, где требования к точности, надежности и безопасности конструкций постоянно возрастают, методы неразрушающего контроля и прецизионной метрологии выходят на первый план. Особенно остро стоит задача контроля качества материалов для объектов с произвольной, зачастую оптически грубой поверхностью, таких как композитные панели летательных аппаратов, элементы микроэлектроники, биологические ткани или произведения искусства. Классические контактные методы зачастую неприменимы, так как могут искажать измеряемые параметры или физически невозможны в условиях эксплуатации (вакуум, высокие температуры, вибрации).

Электронная спекл-интерферометрия (Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI) и ее производная – электронная спекл-интерферометрия со сдвигом, или шерография (Shearography, ESPSI) – представляют собой мощный класс бесконтактных оптических методов неразрушающего контроля, лишенных указанных недостатков [1, 2]. Их уникальность заключается в способности проводить полевые измерения с субмикронной точностью на рассеивающих поверхностях без какой-либо их специальной подготовки [3, 4].

Цель данной работы состоит в том, чтобы провести комплексный аналитический обзор метода электронной спекл-интерферометрии в его современном виде: от физических основ, до передовых технологических решений и спектра применений. На основе анализа текущего состояния и последних инноваций будут оценены перспективы и стратегические векторы развития данного метода в ближайшем будущем.

Метод электронной спекл-интерферометрии основан на явлении интерференции когерентного лазерного излучения, рассеянного шероховатой поверхностью объекта. Образующаяся в результате интерференции спекл-структура (поле спеклов) является уникальным «оптическим отпечатком» поверхности в ее конкретном состоянии. Ключевой принцип электронной спекл-интерферометрии – при деформации или смещении объекта фаза рассеянной волны изменяется, что приводит к модификации спекл-картины. Регистрируя разность между спекл-картинами исходного и деформированного состояния (путем цифрового вычитания), получают интерференционные полосы (спекл-интерферограммы), несущие количественную информацию о поле смещений.

Фундаментальное отличие электронной спекл-интерферометрии от классической интерферометрии заключается в объекте измерения [4, 5]. Классическая интерферометрия работает с гладкими, зеркальными поверхностями. Измеряет регулярную интерференционную картину от эталонного и объектного волновых фронтов. Электронная спекл-интерферометрия работает с диффузно рассеивающими поверхностями, использует статистические свойства случайных спекл-полей, несущих информацию о микрорельефе. Это делает метод инвариантным к плоскопараллельным смещениям объекта, которые «обнуляют» классическую интерференционную картину.

Существующие сегодня системы электронной спекл-интерферометрии можно классифицировать по ряду основных характеристик: по способу разделения оптических путей; по уходу от фазовой неоднозначности при деформации исследуемого объекта, а также по типу используемых источников излучения [3, 4, 6–8, 13–20].

По способу разделения оптических путей существуют следующие основные схемы спекл-интерферометрии [4]:

- с опорным пучком: классическая схема, где лазерный пучок делится на объектный и гладкий опорный, интерферирующие на матрице камеры. Отличается высокой чувствительностью, но критична к вибрациям и требует высокой когерентности лазера (рис. 1);

- без опорного пучка (с двумя объектными пучками): два пучка освещают объект под разными углами, интерферируя непосредственно на его поверхности. Схема более устойчива к внешним воздействиям (рис. 2);

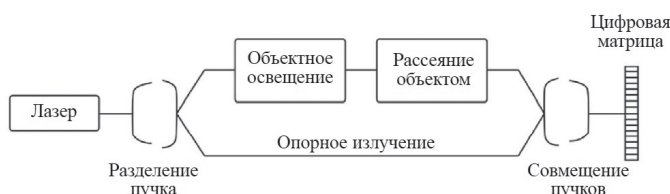


Рис. 1. Схема реализации спекл-интерферометрии с опорным пучком

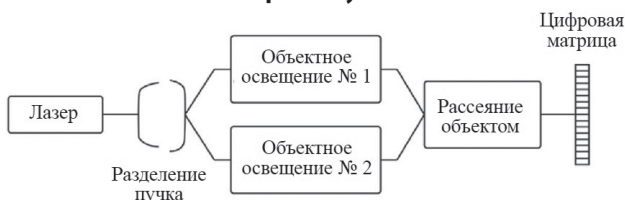


Рис. 2. Схема реализации спекл-интерферометрии с двумя объектными пучками

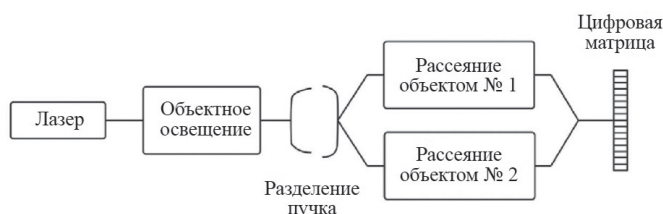


Рис. 3. Схема реализации сдвиговой интерферометрии

- сдвиговая интерферометрия (шерография): используется один пучок освещения. С помощью сдвигового элемента (бипризмы, интерферометр Майкельсона) на камере формируются два смещенных изображения объекта, интерферирующие друг с другом (рис. 3).

Данный метод измеряет не смещения, а их пространственные производные (градиенты), т.е. деформации напрямую. Обладает исключительной устойчивостью к жестким смещениям объекта, что делает его идеальным для промышленного применения [9–12].

В качестве источника излучения в электронной спекл-интерферометрии помимо стандартных непрерывных гелий-неоновых и полупроводниковых лазеров, для специфических задач используют импульсные лазеры и частично когерентный свет от звезд [4].

Современные разработки в области электронной спекл-интерферометрии направлены на создание компактных, портативных и даже носимых систем ESPI/ESPSI, что особенно востребовано для полевых измерений и мониторинга крупногабаритных конструкций (рис. 4).

Использование волоконно-оптических компонентов, микро-оптических элементов (MEMS) и полупроводниковых лазеров с длиной волны в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне позволяет существенно уменьшить габариты и массу установок. Например, в работе [21] представлена портативная система шерографии на основе волоконной оптики, интегрированная с мобильным вычислительным блоком, которая успешно применялась для контроля композитных панелей в аэрокосмической отрасли без необходимости демонтажа конструкций. Другим примером является разработка компактного ESPI-сканера с использованием лазерного диода и миниатюрной ПЗС-матрицы, обеспечивающий разрешение до 0,1 мкм при весе менее 2 кг [22].

В металлообрабатывающей промышленности классические интерферометры исторически используются для контроля чистоты обработки металлических поверхностей. В частности, интерферометр Линника позволяет изучать и контролировать качество полировки зеркальных поверхностей с точностью до сотых долей длины волны света. Тот же принцип лежит в основе интерференционных дилатометров, которые фиксируют удлинение образ-

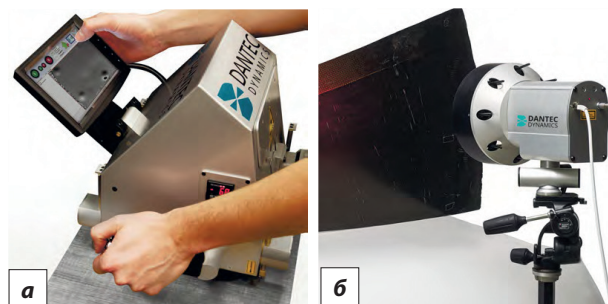


Рис. 4. Компактные системы шерографии фирмы DANTEC DYNAMICS (Дания): а – мобильная система Q-810; б – штативная система Flaw Explorer

цов металлов под воздействием температуры с точностью до 0,02 мкм, что критически важно для материаловедения.

Одним из наиболее востребованных применений ESPI в металлургии является диагностика остаточных напряжений. Эти напряжения, возникающие после сварки, литья или термообработки, являются основной причиной разрушения сварных конструкций (трубопроводы, корпуса судов) и изделий ответственного назначения. Для их определения широко используется метод зондирующего отверстия в сочетании с лазерной интерферометрией [23]. Разработанные на основе этого метода методики легли в основу национального стандарта ГОСТ Р 52891 «Контроль остаточных технологических напряжений методом лазерной интерферометрии» [24].

Еще одной важной областью является исследование процессов резания металлов. Классические методы, такие как метод делительных сеток, не позволяют с высокой точностью изучать деформации непосредственно в зоне стружкообразования, особенно при малых припусках. Применение цифровой корреляционной спекл-интерферометрии позволяет бесконтактно получать полные поля векторов перемещений и деформаций в зоне резания в реальном времени. Например, в экспериментах по точению меди М1 этот метод успешно использовался для анализа кинематики процесса стружкообразования с высокой точностью [25].

Обработка интерферограмм все чаще выполняется с применением методов искусственного интеллекта (ИИ), что позволяет автоматизировать анализ, снизить влияние шумов и ускорить получение результатов. Алгоритмы глубокого обучения, в частности сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN), используются для:

- автоматической развертки фазы (phase unwrapping) даже в условиях высокого уровня шума;
- классификации дефектов (трещины, расслоения, коррозия) на основе текстурных признаков интерферограмм;
- прогнозирования развития деформаций при циклических нагрузках с использованием рекуррентных нейронных сетей (RNN) [28].

Расширение спектрального диапазона измерений позволяет повысить информативность и точность метода. Многоспектральная ESPI, использующая несколько лазеров с разными длинами волн, применяется для:

- устранения неоднозначности при больших деформациях за счет метода двух длин волн [26];
- исследования многослойных и композитных структур за счет разной глубины проникновения излучения [27];
- контроля температурных полей при использовании инфракрасных лазеров [28].

Гиперспектральная шерография, позволяет получать 3D-карты деформаций с привязкой к спектральному отклику материала, что особенно полезно для анализа композитов с разнородными компонентами [29].

Комбинирование ESPI/ESPSI с другими методами повышает надежность и глубину диагностики. Наиболее пер-

спективными, на сегодняшний день, являются следующие гибридные системы:

ESPI + термография: одновременный анализ деформаций и тепловых полей для оценки термических напряжений и обнаружения скрытых дефектов. Система представляет собой передовой диагностический инструмент для одновременного получения коррелированных данных о деформационных и тепловых полях объекта. Его сущность заключается в синхронном воздействии на контролируемый образец дозированной тепловой нагрузкой (например, импульсным или модулированным нагревом) и параллельной регистрации отклика с помощью двух оптических систем. Высокоточная инфракрасная камера фиксирует динамику распределения температуры на поверхности, в то время как интерферометрическая ESPI-система, использующая когерентное лазерное излучение, измеряет микроскопические смещения и деформации с точностью до долей микрона, анализируя изменения спекл-картины.

Ключевым достоинством этой гибридной методики является возможность прямого сопоставления причинно-следственных связей между тепловыми процессами и механическим откликом материала в реальном времени. Это позволяет решать две важнейшие задачи. Во-первых, метод обеспечивает прямую экспериментальную оценку термических напряжений, возникающих из-за неоднородного теплового расширения или градиентов температуры, что критически важно для анализа теплонагруженных элементов, таких как турбинные лопатки, электронные платы или сварные соединения. Во-вторых, он значительно повышает надежность обнаружения скрытых внутренних дефектов, таких как расслоения, поры, микротрещины и зоны коррозии. Нарушение сплошности материала локально меняет как теплопроводность (что проявляется в виде аномалий на термограмме — более горячих или холодных пятен), так и жесткость конструкции (что приводит к неоднородностям в поле деформаций, регистрируемом ESPI).

Синхронный анализ двух типов полей дает синергетический эффект: данные взаимно дополняют и верифицируют друг друга, уменьшая вероятность ложных срабатываний и позволяя не только обнаружить, но и более точно классифицировать дефект, оценить его глубину и влияние на прочность.

ESPI + акустическая эмиссия (АЭ): корреляция оптических данных с акустическими сигналами для мониторинга развития трещин в реальном времени. Данная система может быть применима для исследования процессов зарождения и развития повреждений в материалах и конструкциях в реальном времени. Ее принцип основывается на синхронной регистрации и корреляции двух принципиально разных типов отклика материала на приложенную механическую нагрузку: оптически наблюдаемых полей микроскопических деформаций и генерируемых внутренними дефектами высокочастотных акустических волн. Система ESPI, используя лазерное освещение и интерференцию спекл-полей, с высокой точностью (до долей

микрона) измеряет полное поле смещений и деформаций на поверхности объекта, визуализируя зоны концентрации напряжений и начальные стадии пластической деформации. Параллельно высокочувствительные пьезоэлектрические датчики акустической эмиссии, закрепленные на объекте, улавливают ультразвуковые импульсы, испускаемые в моменты резкого высвобождения энергии при таких событиях, как зарождение трещины, ее скачкообразное продвижение, разрыв волокон в композитах или трение поверхностей разрушения.

Главным преимуществом этой комбинации является возможность установления прямой причинно-следственной связи между конкретным акустическим событием, зафиксированным системой АЭ (включая его временную метку, координаты, амплитуду и спектральные характеристики), и мгновенной оптической картиной деформации в этой же точке и в тот же момент времени, предоставляемой ESPI. Это позволяет не просто констатировать факт активности дефектов, а детально исследовать механику их развития. Например, метод позволяет визуализировать, как именно перед скачком трещины в ее окрестности перераспределяются деформационные поля, а последующий акустический импульс подтверждает момент ее нестабильного роста.

Такая корреляция незаменима для мониторинга критически важных конструкций, таких как элементы летательных аппаратов, роторы турбин или сосуды высокого давления, где необходимо не только обнаружить трещину, но и оценить ее опасность, активность и потенциальную скорость развития под нагрузкой.

ESPI + томография (КТ): создание цифровых двойников объектов с интегрированными данными о внутренней структуре и поверхностных деформациях [30]. Система представляет собой передовую технологию для создания всесторонних высокоточных цифровых двойников сложных объектов. Принцип действия данной системы заключается в интеграции двух дополняющих друг друга видов данных: трехмерной информации о внутренней микроструктуре, полученной с помощью рентгеновской или синхротронной томографии, и данных о полях микроскопических деформаций на поверхности, измеренных методом ESPI в ответ на приложенные нагрузки. КТ-сканирование обеспечивает неразрушающее послойное исследование объекта, выявляя внутренние поры, включения, трещины, границы раздела фаз и точно определяя их геометрию, положение и ориентацию в пространстве, что позволяет построить точную цифровую 3D-модель внутреннего устройства.

Последующее или одновременное исследование этого же объекта методом ESPI, который с помощью лазерной интерференции регистрирует карты смещений и деформаций на поверхности с нанометрической чувствительностью, дает информацию о его функциональном механическом отклике. Особенностью данной гибридной методики является не простое сложение двух наборов данных, а их глубокая пространственная корреляция и совместный анализ, который позволяет создать цифрового двойника, отражающего не только статиче-

скую геометрию, но и функциональное поведение. Это открывает уникальные возможности для верификации и уточнения инженерных расчетов методом конечных элементов (FEA): трехмерная модель, построенная на основе реальных томографических данных, включая естественные дефекты, используется для создания расчетной сетки, а экспериментальные поля деформаций, полученные с ESPI при различных нагрузках, служат эталоном для проверки и калибровки этой модели.

Такой подход позволяет с высокой точностью оценивать реальные механические свойства материалов, прогнозировать развитие повреждений из конкретных внутренних дефектов, оптимизировать структуру изделий, созданных по аддитивным технологиям, и проводить точный ретроспективный анализ причин отказов.

Активное внедрение ESPI/ESPSI в роботизированные комплексы и системы автоматического позиционирования позволяет проводить неразрушающий контроль качества материалов на крупногабаритных и сложноформатных объектах без участия оператора. Ключевыми направлениями развития здесь являются: а) роботы-манипуляторы с оптическими головками для сканирования поверхностей самолетов, судов, мостов; б) беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оснащенные компактными ESPI-системами для мониторинга труднодоступных конструкций; в) адаптивные системы управления с обратной связью, изменяющие параметры измерений в реальном времени в зависимости от условий.

Проведенный анализ показывает, что электронная спекл-интерферометрия за последние десятилетия прошла впечатляющий путь от лабораторного астрофизического метода до зрелого и технологичного инструмента промышленной диагностики в металлургии. Современное состояние метода характеризуется несколькими ключевыми тенденциями.

Во-первых, это диверсификация схемных решений: наряду с классической схемой с опорным пучком, доминирующее положение в промышленности занимает сдвиговая интерферометрия (шерография), которая благодаря своей устойчивости к вибрациям и жестким смещениям стала идеальным решением для контроля крупногабаритных композитных конструкций в аэрокосмической отрасли.

Во-вторых, наблюдается активная цифровизация и интеллектуализация метода. Уход от пленочной регистрации к цифровым камерам высокого разрешения и внедрение алгоритмов фазового сдвига позволили перейти от качественной визуализации дефектов к количественным измерениям полей деформаций. Современный этап развития не возможен без методов искусственного интеллекта, которые автоматизируют процесс развертки фазы, фильтрации шумов и классификации дефектов, сводя к минимуму влияние человеческого фактора.

В-третьих, ключевым вектором развития является гибридизация и системная интеграция. Комбинирование ESPI с томографией, акустической эмиссией или томографией позволяет создавать цифровые двойники объектов, интегрирующие данные о внутренней структуре и поверхностных деформациях. Это

открывает путь к созданию принципиально новых методик верификации конечно-элементных моделей (FEA) и прогнозирования остаточного ресурса изделий современной металлургии.

Наконец, метод демонстрирует высокую адаптивность к конкретным прикладным задачам. Как показано в обзоре, ESPI успешно решает задачи не только в авиастроении, но и в металлургии, где он применяется для контроля остаточных напряжений, исследования процессов резания и оценки качества поверхности.

Таким образом, электронная спекл-интерферометрия переживает этап зрелости, когда фундаментальные физические принципы, дополненные современной вычислительной мощностью и гибкостью интеграции, позволяют ей оставаться одним из самых точных и информативных методов неразрушающего контроля. Стратегическое развитие метода будет идти по пути миниатюризации (вплоть до носимых систем и установки на БПЛА), повышения скорости измерений (для изучения быстротекущих процессов) и дальнейшей интеллектуализации обработки данных для создания полностью автоматизированных систем диагностики.

Список источников

1. Бугаенко С.Е., Разумовский И.А. Голографическая интерферометрия. Методы и применение в экспериментальной механике деформируемого твердого тела: учеб. пособ. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 43 с.
2. Короленко П.В., Маганова М.С. Основы статистических методов в оптике: Учеб.пособ. / МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИ ядер. физики им. Д.В. Скобельцына. М.: Изд-во Университетская книга, 2010. 163 с.
3. Yang L., Xie X., Zhu L., Wu S., Wang Y. Review of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) for three dimensional displacement measurement // Chin. J. Mech. Eng. 2014. Vol. 27, No. 1. P. 1–13.
4. Jacquot P. Speckle Interferometry: A Review of the Principal Methods in Use for Experimental Mechanics Applications // Strain. 2008. Vol. 44, No. 1. P. 57–69.
5. Yang L., Gao X. Electronic speckle pattern interferometry (ESPI) / Handbook of aser Technology and Applications. Laser Applications. Medical, Metrology and Communication. 2nd Ed. CRC Press, 2021. Vol. IV. P. 19.
6. Рябухо В.П. Спекл-интерферометрия // Соросовский Образовательный журнал. 2001. Т. 7, № 5. С. 102–109.
7. Розен А.Е., Крюков Д.Б., Соловьев В.А. и др. Метод неразрушающего контроля качества многослойных металлических материалов, полученных сваркой взрывом // Ползуновский альманах. 2007. №1–2. С. 145–148.
8. Крюков Д.Б., Розен А.Е., Соловьев В.А. и др. Метод электронной корреляционной спекл-интерферометрии для контроля биметаллов, полученных сваркой взрывом // Изв. Волгоградского гос. техн. ун-та. 2006. № 9 (24). С. 76–79.
9. Steinchen W., Yang L. Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry. Bellingham, WA: SPIE Press, 2003. 336 с.
10. Жужукин А.И., Соляников В.А. Виброметрическая установка для получения спекл-интерферограмм с высоким разрешением // Изв. Самар. науч. центра РАН, 2009. Т.11, №3. С. 210–214.
11. Коноплев Ю.Г., Шалабанов А.К. Голографическая интерферометрия и фототехника: Монография / Изд-во Казанского ун-та, 1990. 98 с.
12. Пат. RU2726045C1 СПК G01B 9/02. Сдвиговой спекл-интерферометр (варианты) / Вишняков Г.Н., Иванов А.Д., Виноградов Ф.Ю. — № 2019143561; заявл. 24.12.2019; опубл. 08.07.20, Бюл. № 19. 14 с.
13. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Мних Н.М. Спекл-интерферометрический метод регистрации полей смещений при деформации // Заводская лаборатория. 1990. № 2. С. 90–93.
14. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Polyakov S.N. Instrumentation for speckle interferometry and techniques for investigating deformation and fracture // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4900, Part 2. P. 1197–1208.
15. Kujawinska M., Wojak J. Spatial phase-shifting techniques of fringe pattern analysis in photomechanics // Second International Conf. on Photomechanics and Speckle Metrology. SPIE. 1991. Vol. 1554. P. 503.
16. Pedrini G., Tiziani H.J. Double-pulse electronic speckle interferometry for vibration analysis // Applied optics. Optica Publishing Group. 1994. Vol. 33, No. 34. P. 7857–7863.
17. Соловьев В.А., Розен А.Е., Крюков Д.Б. Метод фотоэлектронной корреляционной спекл-интерферометрии для неразрушающего контроля биметаллов, полученных сваркой взрывом // Тр. междунар. симп. «Надежность и качество». 2006. Т. 1. С. 370–372.
18. Крюков Д.Б., Соловьев В.А., Розен А.Е., и др. Голографическая интерференционная дефектоскопия композиционных материалов, полученных сваркой взрывом // Изв. Волгоградского гос. техн. ун-та. 2008. № 3 (41). С. 98–100.
19. Solovev V.A., Kryukov D.B., Los I.S., Khorin A.V. Speckle interferometry as a tool for testing clad metals Rozen A.E. / Shock-assisted materials synthesis and processing: Science, Innovations, and Industrial Implementation (EPNM-2008). 2008. P. 19.
20. Зуев Л.Б., Поляков С.Н., Горбатенко В.В., Лопачев Е.Л. Метод вычислительной декорреляции цифровых спекл-изображений для исследования пластической деформации // Автометрия. 2003. Т. 39, № 5. С. 102–111.
21. Francis D., Tatam R., Groves R. Shearography technology and applications: A review // Meas. Sci. Technol. 2010. Vol. 21. P. 102001. doi: 10.1088/0957-0233/21/10/102001
22. Yang L., Gao X. Electronic speckle pattern interferometry (ESPI) / Handbook of aser Technology and Applications. Laser Applications. Medical, Metrology and Communication. 2nd Edition. CRC Press. 2021. Vol. IV. P. 19.
23. Апальков А.А., Одинцов И.Н., Разумовский И.А. Метод измерения остаточных напряжений в массивных элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69, № 2. С. 45–49.
24. ГОСТ Р 52891–2007. Контроль остаточных технологических напряжений методом лазерной интерферометрии. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2009. 8 с.
25. Филиппов А.В., Габдулганиев А.В. Применение спекл-интерферометрии для экспериментального исследования стружкообразования при резании меди М1 // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9369> (дата обращения: 02.03.2026).
26. Daffara C., Mazzocato S., De Rubeis T., Ambrosini D. A simple method for artworks monitoring by simultaneous speckle interferometry (ESPI) and speckle photography // Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VIII. SPIE. 2021. Vol. 11784. P. 79–86.
27. Пат. RU 2475725 C1 МПК G01N 21/88. Способ неразрушающего экспресс-контроля сварных соединений и устройство, его реализующее. — № 2011137917/28; заявл. 14.09.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5. 8 с.
28. Campos L.M.P., Parra D.F., Vasconcelos M.R., Vaz M., Monteiro J. DH and ESPI laser interferometry applied to the restoration shrinkage assessment // Radiation Physics and Chemistry. Elsevier. 2014. Vol. 94. P. 190–193.
29. Barducci A., Pippi I. Analysis and rejection of systematic disturbances in hyperspectral remotely sensed images of the Earth // Applied Optics. Optical Society of America. 2001. Vol. 40, No. 9. P. 1464–1477.
30. Mendels D.A., Shaw R.M. Detection of Sub-surface Defects in Multi-layered Polymer Composites by Speckle Pattern Interferometry // Measurement Note MATC MN17, (2002), National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, TW11 0LW, UK, 2002.