

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ВНУТРЕННИХ ТРЕЩИН В КОМПОЗИТАХ, АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОВОЛОКНОМ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ СДВИГА

© 2023 г. Бехнам Ахунди^{1*}, Вахид Моданлу¹

¹Технологический университет Сирджана, Сирджан, провинция Керман, 7813733385 Иран,
E-mail: *b.akhoundi@sirjantech.ac.ir

Поступила в редакцию 23.04.2023; после доработки 20.05.2023
Принята к публикации 26.05.2023

Лазерная интерферометрия сдвига является одним из новых методов неразрушающего контроля, который основан на интерференции монохроматических волн, которые отражаются от поверхности образца. С помощью данного метода можно с высокой скоростью и точностью производить контроль полной поверхности изделия при прямых измерениях изменения градиента. В данной статье исследована возможность контроля подповерхностных трещин различной длины и углов ориентации в композитных материалах при использовании метода сдвига и системы тепловой стимуляции. Для этой цели были сформированы искусственные трещины различной длины и углов ориентации в произведенных композитах. После подтверждения эффективности приложения воздействия к образцам использовались два радиационных источника теплового излучения. Было исследовано влияние переменных величин нагрузки, размера и направления сдвига, длины трещины и ее угла на качество результатов контроля. Результаты показывают, что изменение величины воздействия играет более важную роль в правильном обнаружении трещин, чем изменение величины сдвига. Для достижения наилучших результатов при контроле трещин на выбранных образцах было подобрано оптимальное тепловое воздействие, равное 12 и 15 с от передней части образца. Кроме того, оптимальная величина сдвига в исследованных композитных образцах оценивался примерно в 10 % от ширины изображения, регистрируемого камерой. Используя оптимизированные значения, были идентифицированы все подповерхностные трещины

Ключевые слова: интерферометрия сдвига, неразрушающий контроль, композитные материалы, обнаружение трещин, стекловолокно.

DOI: 10.31857/S0130308223070059, EDN: DWLBBU

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы композитные материалы широко используются в различных отраслях промышленности, таких как производство аэрокосмических систем, благодаря своим особым характеристикам, включающим высокое отношение прочности к весу и низкий коэффициент теплопроводности по сравнению с металлами. С другой стороны, технология производства этих материалов такова, что в результате они приобретают нежелательные свойства, такие как неоднородность и анизотропия. Поэтому потенциал для возникновения различных дефектов (трещины, отверстия и расслоение) в таких материалах выше, чем в однородных материалах (металлы и полимеры) [1]. Кроме того, другие характеристики, такие как отсутствие электрической и магнитной проводимости в этих материалах, делают очень трудным, а в некоторых случаях и невозможным использование традиционных методов неразрушающего контроля, например, ультразвуковой, магнитно-порошковый, вихретоковый контроль [2]. По этой причине для определения дефектов композитных деталей необходимо использовать подходящий и надежный метод.

Исследования показывают, что многие узлы, которые внезапно выходят из строя, изначально имеют небольшие дефекты (например, трещины и крошечные отверстия). Если такие же мелкие и, казалось бы, незначительные дефекты не обнаружить должным образом, они распространятся и станут причиной выхода из строя и разрушения деталей. Между тем, наличие подповерхностных трещин при циклических и динамических нагрузках является существенным, поэтому необходимо быстро обнаруживать и устранять их, чтобы предотвратить их распространение [3]. Владимиров и др. [4] исследовали особенности зарождения, начала и распространения трещины в прозрачном призматическом образце на основе фрагментов усредненных по времени спекл-изображений, полученных без прерывания циклической нагрузки. По их мнению, этот метод позволяет оценить время, предшествующее зарождению трещины, в зависимости от скорости изменения и предельных значений показателя преломления и плотности материала. Владимиров и др. [5] в другой работе использовали спекл-изображения для определения локальных пластических деформаций, возникающих во время многоциклового усталости в стали 09Г2С.

Цифровая широгрфия является одним из бесконтактных методов лазерного контроля при неразрушающем контроле деталей. В данном методе лазерный луч облучает поверхность образца,

а его отражение регистрируется в камере в виде интерференционной картины. Интерпретируя изменения в интерференционной картине, можно обнаружить некоторые особенности поверхности, такие как смещения и дефекты. В отличие от большинства традиционных методов, которые оценивают только небольшую часть образца за один раз, с помощью широкографии возможно за один шаг полностью исследовать большую область образца и отобразить результаты. Кроме того, поскольку отраженные лучи от поверхности образца, приводящие к интерференции, проходят почти одинаковый путь, чувствительность установки к вибрациям окружающей среды значительно снижается в отличие от других оптических и лазерных методов [6]. Ширография может непосредственно измерять градиент смещения поверхности образца как во внеплоскостном, так и в плоскостном режимах. Исследователи использовали измерение градиента смещения в плоскости с помощью широкографии для прямого измерения остаточной деформации и напряжения в деталях [7—9], а также для неразрушающего контроля во внеплоскостном режиме и поиска внутренних дефектов различных деталей [10, 11].

Этот метод использовался для исследования качества резиновых шин с целью выявления дефектов расслоения между резиной и металлом [12, 13] и для анализа цветного покрытия в произведениях искусства [14]. Кроме того, предыдущие исследования показывают, что метод широкографии использовался в различных случаях, таких как определение дефектов на криволинейных поверхностях [15] и измерение деформации поверхности образца [16]. Большинство предыдущих исследований было направлено на улучшение методики использования широкографии. К исследованиям, проведенным в области количественного анализа изображений, полученных с помощью широкографии, относятся извлечение фазы из полученных изображений и анализ комплексных фаз [17], измерение наклона и градиента поверхности объекта [18—20] и измерение деформации поверхностей, например, сварные точки [21]. Поскольку с помощью широкографии непосредственно измеряются нестандартные деформации на поверхности образца, вызванные подповерхностными дефектами, успешный и надежный контроль с помощью широкографии зависит от размеров дефекта и его глубины от поверхности, размера и типа нагрузки, а также величины и направления сдвига. С другой стороны, основным недостатком этого метода является изменение основных параметров для обнаружения дефектов различных типов, поэтому, изменяя материал образца, необходимые параметры, такие как размер нагрузки, величина и направление сдвига, должны быть оптимизированы в соответствии с требуемым материалом.

Впервые в 1980 году Nakadate et al. [22] использовали электронную камеру и цифровое изображение вместо фотопленок для записи изображений, и этот метод был использован в неразрушающем контроле. Далее обсуждаются наиболее важные исследования, проведенные в области, связанной с данной работой. В области обнаружения трещин в композитных материалах Liu et al. [23] применяли методы пьезографического и вибрационного нагружения для обнаружения трещин в металлических образцах. Они показали, что наилучшие результаты получаются, если частота вибрации близка к частоте пьезоэлектрического резонанса. Pezzoni и др. [24] проделали отверстия различных размеров и глубины на образцах композита, армированного стекловолокном, с сотовой структурой, который используется в строении концевых лопастей вертолетов, и исследовали их с помощью системы тепловой стимуляции с использованием широкографии. Они пришли к выводу, что с помощью широкографии можно одновременно исследовать всю поверхность образца и выявлять дефекты. Кроме того, часть лопасти вертолета была подвергнута усталостной нагрузке для выявления возможных дефектов методом широкографии. Авторы обнаружили, что благодаря тому, что широкография является бесконтактным методом по сравнению с традиционными методами, деталь может быть исследована во время усталостного нагружения без прекращения нагружения, что является важным моментом в неразрушающем исследовании промышленных деталей. Choi et al. [25] искусственно смоделировали дефект межслойного разделения, поместив тефлон различных размеров между слоями композитов, армированных углеродными волокнами, и композитов с сотовой структурой.

Затем они были исследованы методом широкографии. В дополнение к выявлению местоположения дефектов они могли оценить их количественный размер с помощью спекл-шаблонов и предложили широкографию в качестве подходящего метода для количественной и качественной оценки дефектов расслоения в композитных образцах. Huang et al. [26] изучали подповерхностные дефекты в образцах ПВХ, стали и армированного волокнами бетона, используемых при строительстве мостов. Рассматриваемыми дефектами были подповерхностные отверстия и трещины. Они использовали систему термической стимуляции с помощью мощной импульсной лампы для создания деформации на поверхности. Предложенный ими метод использует высокоэнергетический тепловой поток для возбуждения образца и обнаружения тепловой деформации с помощью

нестандартной установки для измерения сдвига. Они смогли выявить все дефекты, используя этот тип воздействия. Chehrghani et al. [27] создали подповерхностные искусственные дефекты в виде отверстий различных размеров и глубины на алюминиевых образцах и исследовали их с помощью метода широгрaфии и системы термической стимуляции. Они пришли к выводу, что отношение диаметра к глубине дефектов является наиболее важным фактором для определения подповерхностных дефектов и что минимальный диаметр обнаруживаемого дефекта должен быть примерно в 2,5 раза больше его глубины. Liu et al. [28] исследовали способность широгрaфии обнаруживать дефекты в металлических и полимерных образцах. В их работе воздействие было тепловым, а обнаруживаемые дефекты представляли собой отверстия и трещины, была построена диаграмма выявляемых областей для дефектов различной глубины.

Для более точной оценки методом широгрaфии необходимо изучить угловые трещины и сравнить термическое и растягивающее воздействие, а также изменить материал образца на композитные материалы, которые имеют гораздо более важное приложение, чем полимерные материалы.

В работах, посвященных изучению трещин в композитах, для обнаружения трещин использовали механическое нагружение. Однако, в связи с большими преимуществами термического воздействия, необходимо исследовать эффективность этого метода воздействия для обнаружения трещин. В данной работе для обнаружения подповерхностных трещин с различными размерами и углами в композитных материалах применяли метод цифровой широгрaфии с помощью теплового воздействия. Таким образом, с акцентом на исследуемый материал обнаружение трещин на композитных материалах осуществляется посредством термического воздействия керамическими нагревателями без создания дополнительного освещения. Учитывая преимущества термического воздействия, в частности простота приложения нагрузки и лучший контроль, развитие этого метода для обнаружения трещин в композитных материалах и извлечение его основных параметров является основной целью данной работы. Поэтому после внедрения макета и обеспечения точности его работы для создания деформации на поверхности образца использовали термическое воздействие двумя керамическими источниками излучения. Путем создания различных трещин в композитных образцах была исследована эффективность широгрaфии в их обнаружении. Кроме того, для этих образцов было определено оптимальное значение величины нагрузки и величины сдвига. Также было изучено влияние указанных параметров на качество результатов обнаружения трещин. В связи с этим, помимо решения многих ограничений механического нагружения, таких как необходимость сложной организации нагружения, а также создание шума и механической вибрации, путем уменьшения количества независимых параметров доступ к оптимальному диапазону для обнаружения трещин осуществляется более просто.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Фундаментальные сведения о широгрaфии

Метод широгрaфии основан на интерференции двух световых волн, отраженных от поверхности образца. Для создания необходимой интерференции применяют монохроматический лазерный свет, который отвечает за освещение поверхности образца. Существуют различные методы создания интерференции лазерного света и разделения светового пучка; в данной работе используется интерферометр Майкельсона. Интерферометр Майкельсона состоит из разделительного стеклянного куба, который разделяет пучок света на две части, и двух плоских зеркал, одно из которых закреплено, а другое — меняет положение. На рис. 1 показана общая схема метода широгрaфии. Величина и направление сдвига могут быть отрегулированы желаемым образом с помощью зеркал, встроенных в схему. Таким образом, удерживая одно из них неподвижным и изменяя ориентацию другого зеркала, может быть осуществлен соответствующий сдвиг. Направление сдвига может быть горизонтальным, вертикальным или их комбинацией. Благодаря вращению одного из интерферирующих зеркал, полученное изображение будет содержать два одинаковых изображения, но с боковым смещением. Затем проводится воздействие на образец, и камера делает снимки образца, на которых видно изображение поверхности образца до и после воздействия на него. Эти фотографии представляют собой интерференционные картины, светлые и темные точки которых указывают на точечную интерференцию двух обрезанных изображений, но каждая из них сама по себе не дает никакой информации о том, как меняется форма образца. При вычитании изображений друг из друга с помощью соответствующего программного обеспечения получается темный и светлый рисунок, который называется узором гало. В узоре гало точки на каждом гало имеют одинаковую фазу и имеют разность фаз в 2π радиан с соседним гало [29]. В самом

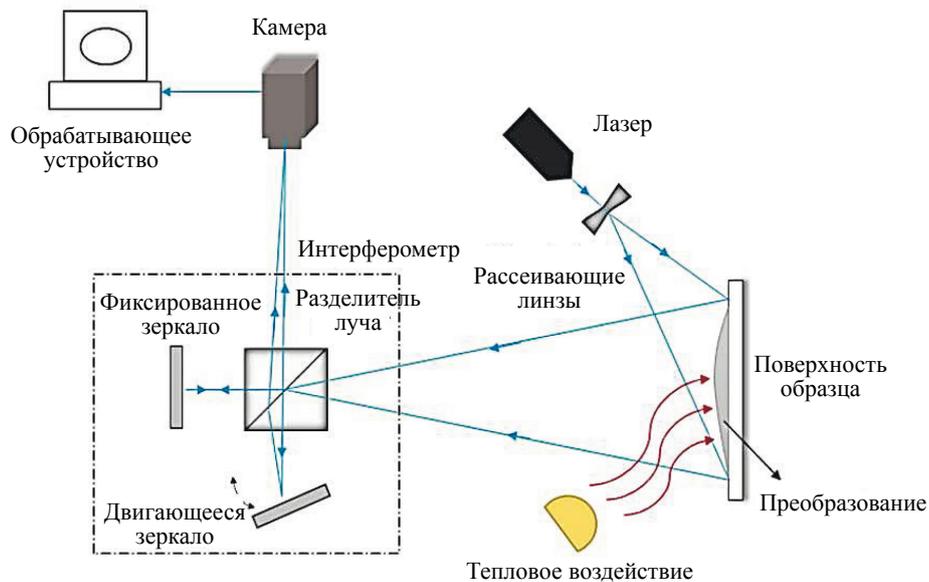


Рис. 1. Схема эксперимента для широкографии, основанного на интерферометре Майкельсона, при тепловом воздействии.

общем случае оптическая разность фаз при малом значении сдвига получается следующим образом [30]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} k_y \frac{\partial v}{\partial x} k_z \frac{\partial w}{\partial x} \right) dx, \quad (1)$$

где $k = (k_x, k_y, k_z)$ — компоненты вектора чувствительности, которые зависят от направления освещения образца лазером и направления наблюдения за отраженными лучами с помощью камеры; φ — фаза изображения; (u, v, w) — смещения вдоль осей x, y и z . Если компоненты k_x и k_y — достаточно малы, чтобы ими пренебречь, система становится полностью чувствительной к производной смещения вне плоскости. В данном случае, если направление лучей, облучающих образец и лучи, зафиксированные камерой, находятся на прямой линии, для сдвига вдоль оси Ox по уравнению (2) получают зависимость непосредственно градиента смещения вне плоскости, а уравнение (3) используется для сдвига вдоль оси Oy . В уравнениях (2) и (3) λ — длина волны лазера, $\Delta\varphi$ — разность фаз изображения, а (d_x, d_y) — величина сдвига.

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi dx}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi dy}. \quad (3)$$

2.2. Оборудование и его устройство

Оборудование для широкографии, используемое в данной работе для выявления трещин, представлено на рис. 2. Согласно данной схеме, для освещения исследуемого образца использовался монохроматический диодный лазер мощностью 50 милливатт. Два плоских зеркала, одно из которых неподвижно, а другое может поворачиваться по горизонтали и вертикали, использовали для сдвига изображений. Величина сдвига измерялась с помощью градуированной пластины в направлениях x и y , которая располагалась перед поверхностью образца. ПЗС-камера, используемая для записи изображений с качеством 2,3 мегапикселя, записывала фотографию образца раз в секунду.

Важным моментом в компоновке макета является способ размещения частей и расстояние друг от друга. Чтобы убедиться в правильности макета и его калибровки, первоначальная оценка была проведена с использованием различных направлений сдвига на образце из оргстекла толщиной 2 мм и диаметром 100 мм, полученные узоры показаны на рис. 3.

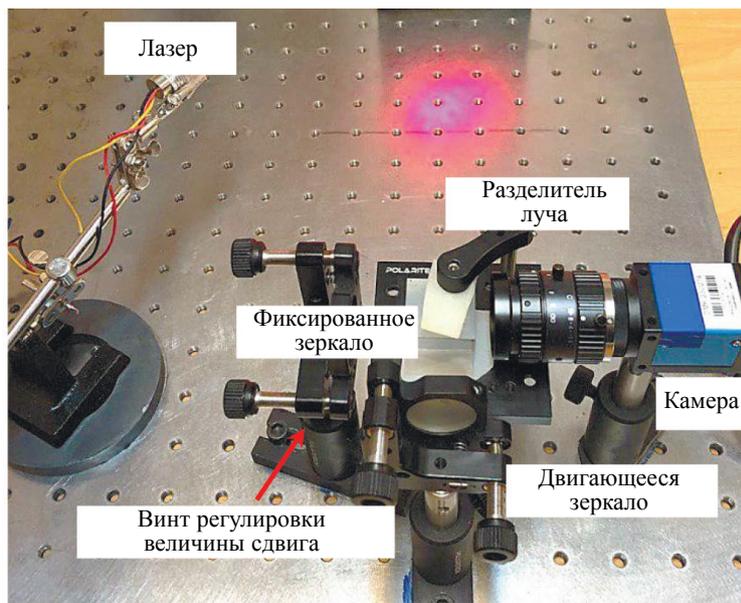
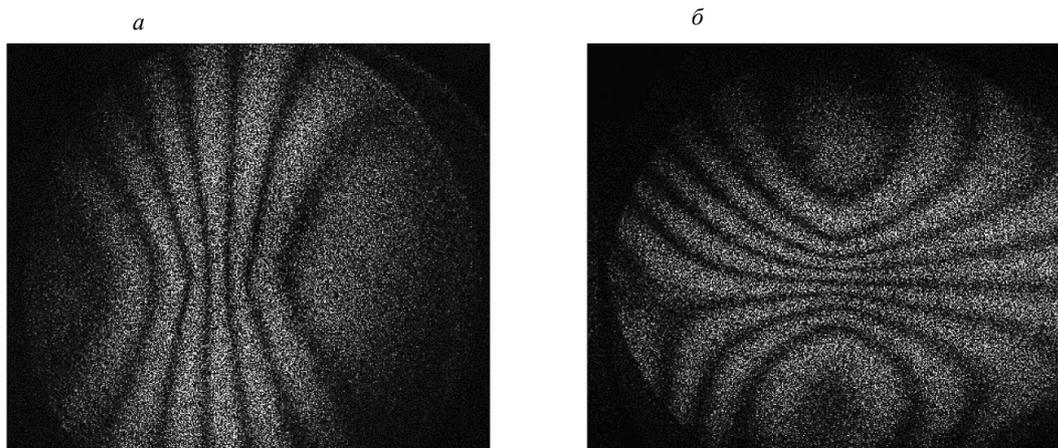


Рис. 2. Установка для широкографии.

Нагрузка на данный образец осуществлялась с помощью давления и микрометра, вмонтированного в заднюю часть образца. Отмечается, что ширина изображения, записанного камерой, составляла 90 мм, что эффективно для получения оптимальной величины сдвига. При проверке работоспособности компоновки использовалась величина различных сдвигов.

Как уже упоминалось, камера для съемки сдвигов делает фотографии до и после воздействия нагрузки, и после нескольких этапов обработки изображений получаются узоры гало. Существуют различные типы нагружения для создания деформации на поверхности образца, такие как растяжение, термическое воздействие, вибрация, относительный вакуум и нагружение давлением, каждый из которых выбирается в зависимости от типа материала и условий доступа к образцу. В данной работе для выявления трещин в композитных материалах использовалась тепловое воздействие с лицевой стороны образца.

При тепловых воздействиях для возбуждения образца обычно применяют мощный световой проектор. Результаты такого воздействия имеют относительно хорошее качество, но его основным недостатком является то, что камера не может делать снимки в процессе воздействия нагрузки, поскольку во время воздействия проектор включен, и только когда проектор выключен

Рис. 3. Узоры на внешней стороне плексигласа для калибровки установки: сдвиг по оси X (а); сдвиг по оси Y (б).

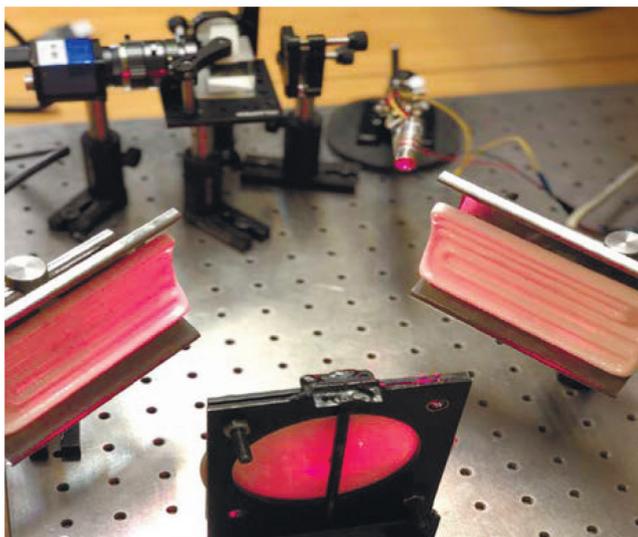


Рис. 4. Применение двух керамических нагревателей с регулируемыми основаниями для разных углов при тепловом воздействии.

и деталь остывает делается снимок. Для решения этой проблемы, согласно рис. 4, был проведен нагрев излучением. Для этого были использованы два керамических нагревателя мощностью 500 Вт с максимальной температурой 350—400 °С. Под ними была установлена подвижная двухпозиционная подставка, под которой располагались нагреватели под нужным углом относительно образца. Поскольку во время нагрева нагреватели не испускают дополнительного света, фотографирование проводилось как в процессе работы нагревателя, т.е. образец нагревался, так и тогда, когда нагреватель был отключен от сети, т.е. образец охлаждался, и наилучшие результаты были получены при охлаждении образца. Его фотографировали и наконец извлекали оптимальное значение для величины теплового воздействия. Возникающее тепловое расширение в образце под действием тепла вызывает небольшую деформацию на поверхности образца. В этом случае, если под поверхностью образца имеется участок нарушения сплошности, например, дефект или разрыв, то нарушение сплошности при расширении и, следовательно, нарушение сплошности при деформации приведет к образованию в дефектных участках узоров гало сдвига.



Рис. 5. Использование бесконтактного термометра для исследования температуры образца в любой момент времени.

Другим важным фактором при оценке методом термического воздействия является время охлаждения образца, которое имеет прямую связь с величиной деформации образца. Так, при увеличении времени охлаждения деформация и внеплоскостное смещение образца увеличиваются. Поэтому после приложения нагрузки для всех спроектированных испытаний было сделано 20 фотографий с интервалом в одну секунду с поверхности образца, так что после приложения воздействия нагревателями образец фотографировался в течение 20 с. В этом случае все 20 фотографий можно сравнить друг с другом, поскольку в каждом случае на образце создавалось небольшое изменение деформации.

Согласно рис. 5, бесконтактный термометр использовался все время при воздействии на образец для оценки количества теплоты, сообщаемой образцу, и анализа результатов в зависимости от интенсивности воздействия. Используя это устройство, температуру образца можно было измерить в любой момент. На образец подавалось тепло от комнатной температуры около 25 до 61 °С (18 с нагрева в самом высоком режиме). При нагружении образец был закреплен со всех сторон и не испытывал вибрации. Далее был исследован оптимальный режим нагружения для достижения наилучших результатов.

2.3. Типы образцов и параметры трещин

Для изготовления композитных образцов в качестве матрицы использовалась эпоксидная смола LV113, а также стекловолокно с ориентацией 0 и 90. Массовое соотношение смолы и отвердителя было 100:20, а время выдержки составило 48 ч. Две пластины с размерами 200×200 мм и толщиной 3 мм, состоящие из 24 слоев стекловолокна, были изготовлены вручную слой за слоем. Затем с помощью гидроабразивной резки пяти образцов размерами 3×40×100 мм³ были вырезаны из изготовленных пластин. Для увеличения точности изготовления композитных образцов и вероятности отсутствия брака каждый из них был протестирован отдельно с помощью камеры и теплового воздействия.

Таблица 1

Механические свойства композитных образцов

Параметр	Матрица (Полимер)	Волокно
Модуль упругости, ГПа	3,21	71,7
Модуль сдвига, ГПа	1,2	28,9
Коэффициент Пуассона	0,33	0,24
Плотность, кг/м ³	1200	2540
Объемная доля, %	65	35
Коэффициент теплопередачи	0,8	0,8

В данном случае наблюдались только параллельные друг другу гало образцов при воздействии, что свидетельствовало о полном отсутствии дефектов. В табл. 1 приведены механические характеристики исследуемых образцов. На двух образцах образовались четыре поперечные трещины длиной 2, 5, 10 и 15 мм, а на трех других — 3 угловые трещины под углом 0, 30 и 60°, созданные режущим лезвием толщиной 0,3 мм. Глубина каждой трещины составляет около 1 мм. В методе сдвига, если один из размеров дефекта намного меньше другого, меньший размер не окажет большого влияния на результаты. Поскольку ширина трещины мала по сравнению с ее длиной, она не считается значимым фактором для измерений и анализа. На рис. 6 показаны размеры трещин и угол их расположения.

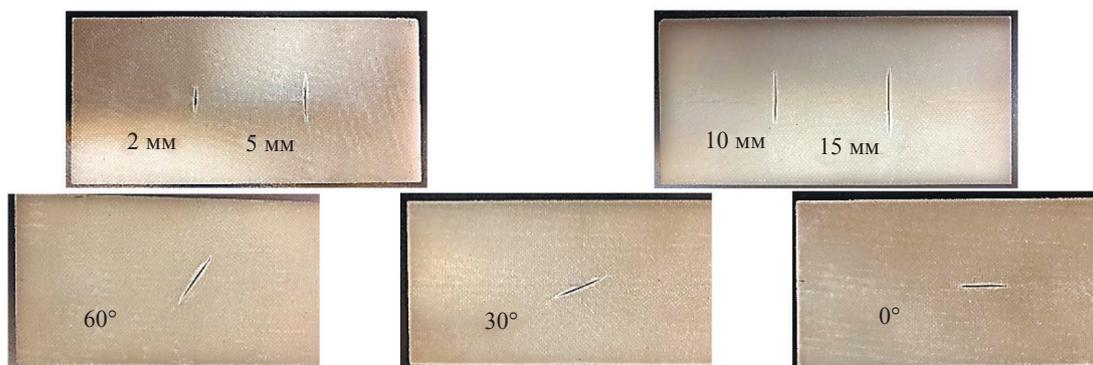


Рис. 6. Размер и расположение трещин на задней стороне образцов.

2.4. Планирование эксперимента

В данной работе помимо обнаружения трещин методом сдвига были также исследованы параметры, влияющие на полученные результаты. Керамические нагреватели обеспечивали повышение температуры образца от 25 до примерно 61 °С. Значения величины воздействия при планировании эксперимента были выбраны равными 9, 12, 15 и 18 с, что соответственно повышало температуру образца от температуры окружающей среды до 48, 52, 57 и 61 °С. Чем больше было время выдержки образца, тем выше становилась температура образца соответственно, это означает, что на него оказывалось большее воздействие.

Температура поверхности во всех экспериментах измерялась с помощью бесконтактного термометра с точностью $\pm 0,1$ % от температуры отсчета и постоянной времени 500 мс, а все изменения контролировались. Во всех повторяющихся экспериментах не наблюдалось большой разницы в результатах измерения температуры поверхности образцов. Поскольку нагреватели нагреваются до определенной степени, а другие параметры, такие как расстояние от нагревателей до поверхности и состояние поверхности образцов, не меняются, единственным влияющим параметром является продолжительность воздействия на образцы, определяющая температуру поверхности. Время воздействия строго контролировалось во всех экспериментах.

Используя метод Тагути в программе Minitab [31], три параметра (размер трещины, величина воздействия и величина сдвига) сравнивали в различных режимах. В этом методе для каждого параметра рассматривалось 4 уровня, а затем было проведено 16 экспериментов для проверки параметров. В табл. 2 показаны характеристики трещин, время нагружения и различные величины сдвига. Кроме того, направление сдвига также применялось в соответствии с направлением трещин, горизонтально и вертикально, а также их комбинацией.

Таблица 2

Уровни исследуемых параметров

Параметр	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4
Длина трещины, мм	2	5	10	15
Время воздействия, с	9	12	15	18
Величина сдвига, мм	7	10	13	16

В табл. 3 показано планирование эксперимента. Результатом экспериментов является решение о пригодности метода для обнаружения различных трещин. Для проверки результатов использовалось отношение сигнал/шум (С/Ш). Это отношение представляет собой чувствительность результата к исследуемым параметрам [32]. Чем выше отношение С/Ш, тем эффективнее обнаружение трещины, т.е. чем выше значение С/Ш, тем меньше дисперсия результатов вокруг заданной вели-

Таблица 3

Планирование эксперимента

Номер эксперимента	Длина трещины, мм	Время воздействия, с	Величина сдвига, мм	Отношение сигнал/шум
1	2	9	4	0
2	2	12	7	15,56
3	2	15	10	19,08
4	2	18	13	12,04
5	5	9	7	6,02
6	5	12	4	9,54
7	5	15	13	18,06
8	5	18	10	19,08
9	10	9	10	6,02
10	10	12	13	18,06
11	10	15	4	12,04
12	10	18	7	15,56
13	15	9	4	6,02
14	15	12	7	20
15	15	15	13	16,90
16	15	18	10	9,54

чины. В данных экспериментах в качестве характеристики были выбраны значения «больше—лучше» на графике отношения С/Ш. Как известно, большее значение отношения сигнал/шум указывает на более эффективное обнаружение трещин. Анализируя результаты этих испытаний и проверяя качество создаваемых гало, можно достичь оптимального значения величины нагрузки и сдвига на образцы, что описано в последующих результатах.

2.5. Обработка изображений

Исходные изображения гало, полученные с поверхности изделия, характеризуются низким качеством, которое должно быть улучшено с помощью нескольких этапов обработки изображений и применения соответствующих фильтров. Программный код MATLAB был использован для вычитания изображений друг из друга. Затем были применены фильтры в соответствии с качеством каждого из них. Этапы обработки изображений включали в себя следующее:

использование сверточного фильтра 55. Такой фильтр, представляющий собой квадратную матрицу 5-го порядка, может увеличивать разрешение изображений и выявлять затемненные части благодаря своему среднему числу. В этом случае данные взвешенные значения соседних пикселей используются для расчета нового значения пикселя. Среднее число в матрице составляло;

медианный фильтр. Такой фильтр делает темные участки еще темнее, а светлые участки еще светлее. Используя данный фильтр, можно различить углы каждого участка с более высоким разрешением;

фильтр резких краев. Этот фильтр был использован для улучшения определения краев и способности определять начало и конец ореолов;

приведение гистограммы ближе к 255. Увеличивая контрастность изображений и осветляя темные участки, можно управлять гистограммой, которая представляет собой частоту светлых и темных участков. Поскольку исходные записанные изображения были немного темными и с низким разрешением, применение к ним фильтра было таким, что частота светлых участков на графике гистограммы была расширена.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Величина воздействия, величина сдвига и направление сдвига являются важными характеристиками при идентификации различных дефектов в деталях методом сдвига. После проведения

многочисленных экспериментов все трещины, образовавшиеся на композитном образце с различными размерами и углами, были выявлены с помощью теплового воздействия. В соответствии со способом размещения нагревателей относительно места расположения образца, наилучшие результаты были достигнуты при воздействии с передней стороны образца в режиме охлаждения. Поскольку чувствительность метода сдвига к незначительным изменениям на микронном уровне поверхностных деформаций очень высока, воздействие должно быть полностью контролируемым и аккуратно прикладываться к образцу. Учитывая тот факт, что при фиксированной величине воздействия количество и плотность гало увеличиваются с увеличением величины сдвига, а также при фиксированной величине сдвига — с увеличением величины воздействия [33], можно сделать вывод, что приложение незначительного воздействия на образец приводит к невозможности создания гало сдвига и, как следствие, к невозможности распознать дефект. С другой стороны, чрезмерная нагрузка также создает интенсивные гало, что затрудняет обнаружение местоположения дефекта.

Согласно результатам, полученным в ходе проведенных экспериментов, в качестве критерия выявляемости трещин был введен параметр отношение С/Ш. Все 16 экспериментов, спланированных по методу Тагути, были повторены 3 раза для максимально возможного измерения точности расположения и нагружения. Результат этих экспериментов рассматривался как степень обнаружения трещин. Таким образом, при тщательном качественном изучении спекл-узоров, полученных в результате экспериментов, изображения, на которых полностью и с отчетливыми гало распознано местоположение трещины, имеют более высокое отношение С/Ш и, как следствие, более высокое отношение С/Ш, которое может быть использовано для определения оптимального значения воздействия. Наилучшие результаты были получены при воздействии на образцы между 12 и 15 с (около 50 — 57 °С). Бесконтактный термометр определял температуру образца в каждый момент времени, поэтому в соответствии с уровнями, указанными для величины воздействия по методу Тагути, за 9 с нагрева температура образца увеличилась до 48 °С, за 12 с — до 52 °С, за 15 с — до 57 °С и за 18 с — до 61 °С.

На рис. 7 показаны результаты анализа С/Ш для проведенных экспериментов. Трещины 15 и 10 мм были обнаружены с большей достоверностью, чем две другие трещины. На этих диаграммах оптимальная величина сдвига составляет около 10 мм, а оптимальный размер нагрузки — от 12 до 15 с. Учитывая большое изменение отношения С/Ш от величины сдвига 4 мм до 10 мм, очевидно, что незначительное изменение величины сдвига может сильно изменить качество гало и чувствительность метода. Более того, из-за большей разницы в соотношении С/Ш на диаграмме величины воздействия по сравнению с диаграммой величины сдвига можно сделать вывод, что изменение параметра величины воздействия играет более важную роль в качестве результатов, чем величина сдвига.

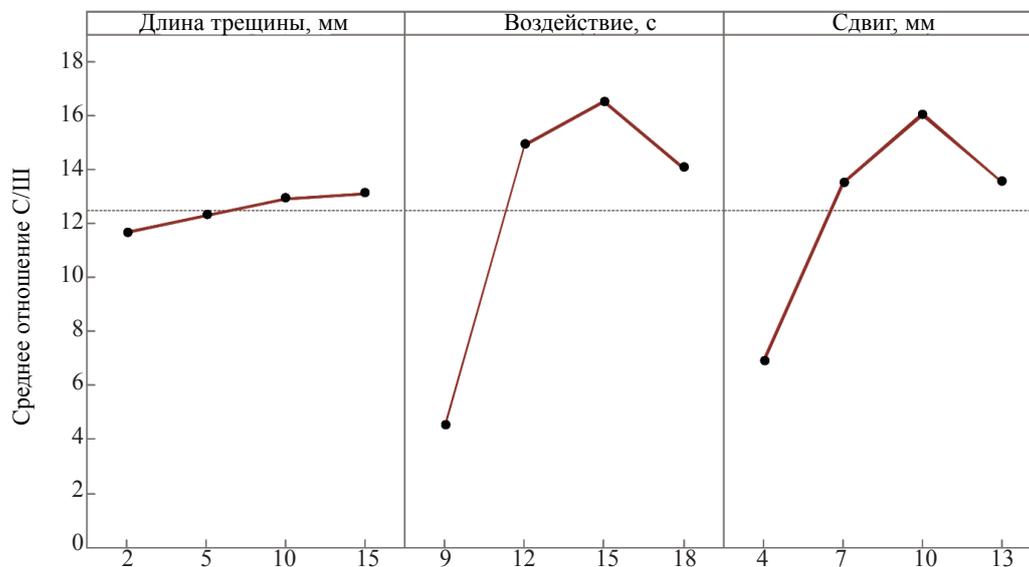


Рис. 7. График отношения С/Ш для анализа длины трещины, величины воздействия и параметров величины сдвига.

С увеличением степени воздействия гало становились плотнее, их количество увеличивалось, но расположение центра гало не менялось. Кроме того, при возрастании величины сдвига при фиксированной нагрузке гало становились более связанными, и наилучшая величина сдвига для обнаружения трещин на образцах составлял около 10 мм. При повышении величины сдвига плотность гало увеличивалась, так что образовывалось много гало на небольшом расстоянии друг от друга. Также при уменьшении величины сдвига от 10 мм количество гало становится меньшим и становится трудно обнаруживать местоположение трещины. Причина этого момента обосновывается согласно уравнениям (2) и (3). В этих уравнениях, при постоянных длине волны и разности фаз, увеличение размера сдвига (d_x или d_y) увеличивает градиент смещения вне плоскости. Аналогично, при уменьшении размера сдвига градиент смещения уменьшается. Поэтому необходимо выбирать оптимальный размер сдвига для достижения оптимального градиента смещения вне плоскости и, как результат, высококачественного узора гало.

Величина сдвига в этих образцах имела прямую зависимость от ширины изображения, зафиксированного камерой, и был сделан вывод, что наиболее оптимальный размер сдвига составляет 0,1 от ширины изображения. Как уже упоминалось, ширина изображения, записанного камерой, составляла 90 мм. На рис. 8 и рис. 9 показаны картины гало различных трещин при оптимальном размере сдвига и величине тепловой нагрузки 12 и 15 с соответственно, что является наиболее оптимальным режимом нагрева. Согласно этим рисункам, все трещины были идентифицированы с хорошей точностью.

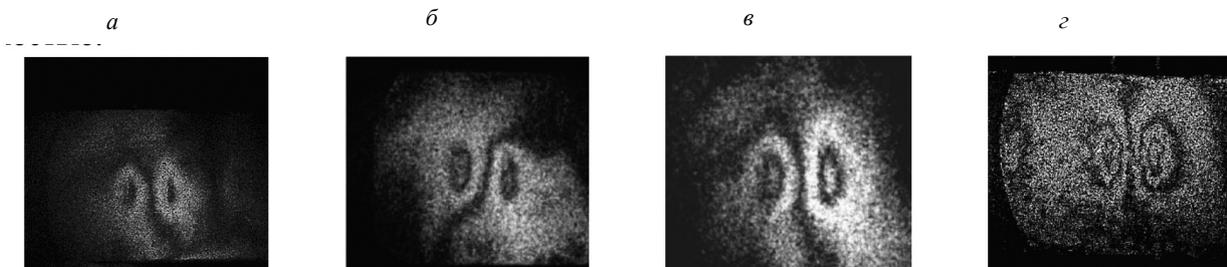


Рис. 8. Картины границ вертикально-треснувших образцов при 12-секундном тепловом нагружении: трещина 2 мм (а); трещина 5 мм (б); трещина 10 мм (в); трещина 15 мм (г).

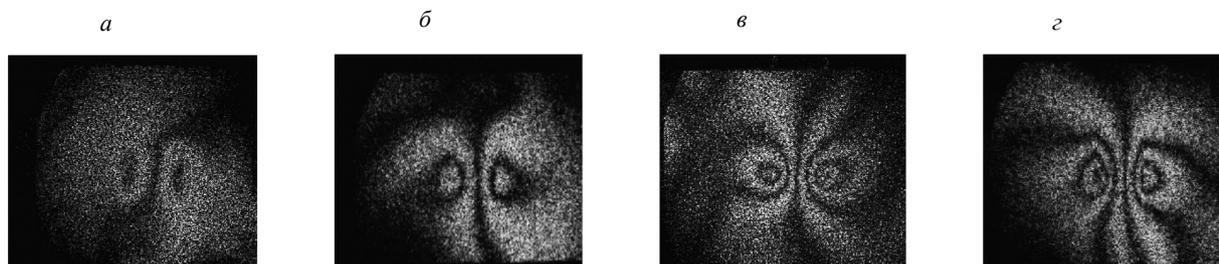


Рис. 9. Картины границ вертикально-треснувших образцов при 15-секундном тепловом нагружении: трещина 2 мм (а); трещина 5 мм (б); трещина 10 мм (в); трещина 15 мм (г).

Согласно результатам исследования Liu et al. [28], проведенного для выявления трещин на алюминиевых образцах, направление сдвига, параллельное направлению дефекта, может повысить эффективность обнаружения трещин. Между тем результаты, полученные при анализе направления сдвига изображения в данной работе, показывают, что при условии, когда направление сдвига находится в направлении, перпендикулярном направлению трещины, достигаются лучшие результаты по сравнению со случаем, когда оно направлено в сторону трещины. Для обнаружения угловых трещин использовалось комбинированное направление сдвига в горизонтальном и вертикальном направлениях. В этом случае направление сдвига измерялось как 30 и 60° относительно горизонтальной линии. На рис. 10 показаны полученные данные гало на образце композита с продольными и угловыми трещинами. Как видно из рисунка, с изменением угла трещины

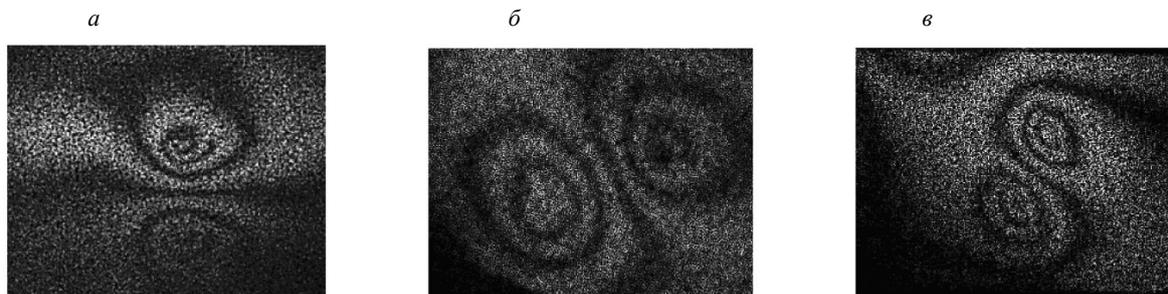


Рис. 10. Картины краев образцов с угловыми трещинами: 0° (а); 60° (б); 30° (в).

изменялся и угол ореолов. Направление приложения нагрузки значительно влияет на ориентацию ореолов, особенно в случае угловых трещин. При тепловом воздействии, используемом в данной работе, направление воздействия удаляется как параметр, поэтому, уменьшив количество параметров, можно было легче достичь оптимальных результатов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе для локализации трещин на образцах композитных материалов, армированных стекловолокном, использовался метод цифрового сдвига с помощью теплового воздействия. Также были исследованы параметры воздействия, размеров и направления сдвига, которые являются основными параметрами при обнаружении трещин, и получены их оптимальные значения. Сначала на образцах композитных материалов были получены трещины с различными параметрами и углами, а затем, используя соответствующий метод планирования эксперимента, была оценена возможность обнаружения трещин и параметры величины воздействия, размера и направления сдвига. Наконец, путем сравнения результатов было установлено, что тепловое воздействие как подходящий метод является эффективным для обнаружения трещин в этих материалах. Общие полученные результаты выглядят следующим образом:

воздействие с передней стороны образца и запись изображения во время его охлаждения дают гораздо лучшие результаты, чем запись изображения во время нагрева образца;

параметр величины воздействия и ее изменения влияют на качество результатов в большей степени, чем величина сдвига;

благодаря тому, что направление сдвига под углом 90° ближе к направлению трещины, результаты получаются более четкими;

оптимальная величина сдвига была оценена как 0,1 ширины изображения, зафиксированного камерой;

для исследованных композитных образцов наилучшие результаты были получены при времени нагружения от 12 до 15 с (около 50—57 °С);

для определения оптимальных параметров и выявления дефектов тепловое воздействие подходит гораздо лучше, чем механическое, благодаря устранению влияния направления воздействия;

в связи с чувствительностью метода сдвига к градиенту вне плоскости, воздействие следует производить равномерно и медленно, чтобы избежать несогласованности изображения и чрезмерной деформации поверхности образца.

Авторы заявляют об отсутствии потенциального конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hung Y. Applications of digital shearography for testing of composite structures // *Composites Part B: Engineering*. 1999. 30 (7). P. 765—773. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(99\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(99)00027-X)
2. Růžek R., Lohonka R., Jironč J. Ultrasonic C-Scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification // *NDT & E International*. 2006. V. 39 (2). P.132—142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.07.012>
3. Clyne T., Hull D. *An introduction to composite materials*. Cambridge university press, 2019.
4. Vladimirov A., Kamantsev I., Drukarenko N., Trishin V., Akashev L., Druzhinin A. Assessing fatigue damage in organic glass using optical methods // *Optics and Spectroscopy*. 2019. V. 127. P. 943—953.

5. *Vladimirov A.P., Drukarenko N.A., Myznov K.Ee.* Using speckle images for determining the local plastic strains arising at high-cycle fatigue of 09G2S steel // *Technical Physics Letters*. 2021. V. 47 (11). P. 777—780.
6. *Hung Y., Ho H.* Shearography: An optical measurement technique and applications // *Materials science and engineering: R: Reports*. 2005. V. 49 (3). P. 61—87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.04.001>
7. *Francis D., James S., Tatam R.* Surface strain measurement of rotating objects using pulsed laser shearography with coherent fibre-optic imaging bundles. *Measurement Science and Technology*. 2008. V. 19 (10). P. 105301. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/10/105301>
8. *Groves R.M., Chehura E., Li W., Staines S.E., James S.W., Tatam R.P.* Surface strain measurement: a comparison of speckle shearing interferometry and optical fibre Bragg gratings with resistance foil strain gauges // *Measurement Science and Technology*. 2007. V. 18 (5). P. 1175. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/5/003>
9. *Groves R.M., James S.W., Tatam R.P.* Full surface strain measurement using shearography // *Optical Diagnostics for Fluids, Solids, and Combustion*. 2001. International Society for Optics and Photonics. P. 142—152. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.449371>
10. *Asemani H., Soltani N.* The Effectiveness of Laser Shearography for the Inspection of Wall Thinning in a Large Aluminum Plate // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019. V. 38 (2). P. 56. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-019-0594-5>
11. *Barmouz M., Behravesh A.H., Reshadi F., Soltani N.* Assessment of defect detection in wood-plastic composites via shearography method // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2016. V. 29 (1). P. 28—36. DOI: <https://doi.org/10.1177/0892705713518810>
12. *Liu B., Guo X., Qi G., Zhang D.* Quality evaluation of rubber-to-metal bonded structures based on shearography // *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*. 2015. V. 58 (7). P. 1—8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11433-015-5658-7>
13. *Zhang Y., Li T., Li Q.* Defect detection for tire laser shearography image using curvelet transform based edge detector // *Optics & Laser Technology*. 2013. V. 47. P. 64—71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.08.023>
14. *Groves R., Pradarutti B., Kouloumpi E., Osten W., Notni G.* 2D and 3D non-destructive evaluation of a wooden panel painting using shearography and terahertz imaging // *Ndt & E International*. 2009. V. 42 (6). P. 543—549. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.04.002>
15. *Sujatha N., Murukeshan V., Rajendran S., Ong L., Seah L.* Non-destructive inspection of inner surfaces of technical cavities using digital speckle shearography // *Nondestructive testing and evaluation*. 2005. V. 20 (1). P. 25—34. DOI: <https://doi.org/10.1080/10589750512331314183>
16. *Xie X., Xu N., Sun J., Wang Y., Yang L.* Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography // *Optics Communications*. 2013. V. 286. P. 277—281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.08.072>
17. *Liu S., Yang L.X.* Regional phase unwrapping method based on fringe estimation and phase map segmentation // *Optical Engineering*. 2007. V. 46 (5). P. 1—9, 9. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.2741232>
18. *Groves R.M., James S.W., Tatam R.P.* Shape and slope measurement by source displacement in shearography // *Optics and lasers in Engineering*. 2004. V. 41 (4). P. 621—634. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(02\)00177-X](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(02)00177-X)
19. *He Y.M., Tay C.J., Shang H.M.* Digital phase-shifting shearography for slope measurement // *Optical Engineering*. 1999. V. 38 (9). P. 1586—1590, 1585.
20. *Huang J.-R., Ford H., Tatam R.* Slope measurement by two-wavelength electronic shearography // *Optics and lasers in engineering*. 1997. V. 27 (3). P. 321—333. DOI: [https://doi.org/10.1016/0143-8166\(95\)00124-7](https://doi.org/10.1016/0143-8166(95)00124-7)
21. *Steinchen W., Kupfer G., Mäckel P.* Full field tensile strain shearography of welded specimens // *Strain*. 2002. V. 38 (1). P. 17—26.
22. *Nakadate S., Yatagai T., Saito H.* Digital speckle-pattern shearing interferometry // *Applied Optics*. 1980. V. 19 (24). P. 4241—4246.
23. *Liu H., Guo S., Chen Y.F., Tan C.Y., Zhang L.* Acoustic shearography for crack detection in metallic plates // *Smart Materials and Structures*. 2018. V. 27 (8). P. 085018/085011—085010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aacfe9>
24. *Pezzoni R., Krupka R.* Laser-shearography for non-destructive testing of large-area composite helicopter structures // *INSIGHT-WIGSTON THEN NORTHAMPTON*. 2001. V. 43 (4). P. 244—248.
25. *Choi S.W., Lee J.H.* Nondestructive evaluation of internal defects for composite materials by using shearography // *Key engineering materials*. 2004. Trans Tech Publ. P. 781—786.
26. *Huang Y., Ng S., Liu L., Li C., Chen Y., Hung Y.* NDT&E using shearography with impulsive thermal stressing and clustering phase extraction // *Optics and Lasers in Engineering*. 2009. V. 47 (7—8). P. 774—781.
27. *Chehrghani A., Fotovat A., Halajian M., Torkamany M.J., Nabavi S.H.* Inspection of metallic samples defects in nondestructive testing by laser shearography with thermal loading // *Nondestructive testing technology*. 2018. V. 2 (2). P. 19—25.

28. *Liu Z., Gao J., Xie H., Wallace P.* NDT capability of digital shearography for different materials // *Optics and Lasers in Engineering*. 2011. V. 49 (12). P. 1462—1469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.04.006>
29. *Yang L., Chen F., Steinchen W., Hung M.Y.* Digital shearography for nondestructive testing: potentials, limitations, and applications // *Journal of Holography and Speckle*. 2004. V. 1 (2). P. 69—79. DOI: <https://doi.org/10.1166/jhs.2004.010>
30. *Francis D., Tatam R., Groves R.* Shearography technology and applications: a review // *Measurement science and technology*. 2010. V. 21 (10). P. 102001. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/10/102001>
31. *Hung Y., Chen Y.S., Ng S., Liu L., Huang Y., Luk B., Ip R., Wu C., Chung P.* Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2009. V. 64 (5—6). P. 73—112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2008.11.001>
32. *Moradian M., Doniavi A., Modanloo V., Alimirzaloo V.* Process parameters optimization in gas blow forming of pin-type metal bipolar plates using Taguchi and finite element methods. 2017.
33. *Modanloo V., Gorji A., Bakhshi-Jooybari M.* A comprehensive thinning analysis for hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2019. V. 43. P. 487—494.
-