

Струнгарь Е.М., Лобанов Д.С. Развитие метода корреляции цифровых изображений (КЦИ) применительно к механическим испытаниям при повышенных температурах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 3. – С. 147–159. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.15

Strungar E.M., Lobanov D.S. Development of the digital image correlation (DIC) method for mechanical testing at elevated temperatures. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2022, no. 3, pp. 147-159. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.15



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2022

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.15

УДК 620

РАЗВИТИЕ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИМЕНительно К МЕХАНИЧЕСКИМ ИСПЫТАНИЯМ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Е.М. Струнгарь, Д.С. Лобанов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 20 сентября 2022 г.

Одобрена: 10 октября 2022 г.

Принята к публикации:

01 ноября 2022 г.

Ключевые слова:

метод корреляции цифровых изображений, полимерный композиционный материал, экспериментальная механика, напряженно-деформированное состояние, повышенные температуры, испытания на растяжение.

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований по оценке работоспособности бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D и метода корреляции цифровых изображений при испытаниях на растяжение композитов в условиях нормальной и повышенных температур. Проанализированы зависимости регистрируемых значений деформации двумя независимыми методами измерений: метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) и навесной экстензометр. Испытания проводились в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5882, в состав которой входит термокамера с рабочим диапазоном температур от -100° до $+350^{\circ}$ °С. Исследовались образцы композиционного материала, изготовленного из стеклотекстолита СТЭФ и углепластика. Испытания на растяжение проводились при температурах 22° , 100° , 120° , 200° и 300° °С. Предложены рекомендации по проведению температурных испытаний с использованием метода КЦИ. По результатам испытаний построены диаграммы деформирования. Получены поля и эпюры продольных деформаций при разных уровнях температур. Проведена подробная оценка мелкодисперсного покрытия, необходимого для реализации метода КЦИ при температурных испытаниях.

© ПНИПУ

© Струнгарь Елена Михайловна – к.ф.-м.н., н.с., e-mail: cem.spaskova@mail.ru, [iD: 0000-0002-2246-8638](https://orcid.org/0000-0002-2246-8638)

Лобанов Дмитрий Сергеевич – к.т.н., с.н.с., e-mail: cem.lobanov@gmail.com, [iD: 0000-0003-1948-436X](https://orcid.org/0000-0003-1948-436X)

Elena M. Strungar – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Researcher, e-mail: cem.spaskova@mail.ru,

[iD: 0000-0002-2246-8638](https://orcid.org/0000-0002-2246-8638)

Dmitrii S. Lobanov – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: cem.lobanov@gmail.com,

[iD: 0000-0003-1948-436X](https://orcid.org/0000-0003-1948-436X)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

DEVELOPMENT OF THE DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC) METHOD FOR MECHANICAL TESTING AT ELEVATED TEMPERATURES

E.M. Strungar, D.S. Lobanov

Perm National Research Polytechnic University, Center of Experimental Mechanics, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 September 2022
Approved: 10 October 2022
Accepted for publication:
01 November 2022

Keywords:

digital image correlation method, polymer composite material, experimental mechanics, stress-strain state, elevated temperatures, tensile tests.

ABSTRACT

The results of experimental studies on the evaluation of the performance of the non-contact optical video system Vic-3D and the digital image correlation method during tensile tests of composites under normal and elevated temperatures are presented. The dependences of the recorded strain values are analyzed by two independent measurement methods: the digital image correlation method (DIC) and a mounted extensometer. The tests were carried out at the Center of Experimental Mechanics of the Perm National Research Polytechnic University using the Instron 5882 universal electromechanical testing system, which includes a thermal chamber with an operating temperature range of -100° to $+350^{\circ}$ C. Samples of a composite material made of STEF fiberglass and carbon fiber were studied. Tensile tests were carried out at temperatures of 2° , 100° , 120° , 200° , and 300° C. Recommendations for conducting temperature tests using the DIC method are proposed. Based on the test results, deformation diagrams were constructed. Fields and diagrams of longitudinal deformations are obtained at different temperature levels. A detailed evaluation of the finely dispersed coating required for the implementation of the DIC method in temperature tests has been carried out.

© PNRPU

Введение

Способность предсказывать поведение композитных конструкций в условиях наличия неоднородных деформационных полей является серьезной проблемой при проектировании инженерных конструкций. Многие конструкции содержат тысячи отверстий для соединения и открытые вырезы. Было проведено множество исследований для изучения влияния отверстий на прочность в композитных структурах [1; 2]. Сложные механизмы повреждения и разрушения, присутствующие на этапе нагружения в композитах, увеличиваются по мере нагружения и в случае наличия концентрации напряжений. В настоящее время всё чаще применяются композиционные материалы в конструкциях элементов авиационных двигателей, работающих в условиях сложного температурного воздействия [3]. Опыт и объем исследований по применению композитов в деталях и узлах, подверженных длительным интенсивным температурным и силовым воздействиям, значительно меньше, чем для большинства сталей и сплавов. Влияние концентраторов напряжений на термомеханическое поведение композитных конструкций зависит от масштабных эффектов [4; 5], а также от способности материала выдерживать перенапряжения вблизи отверстия. Эта способность тесно связана с пластичностью матрицы. Способность матрицы передавать нагрузку на волокно ухудшается при повышенной температуре.

Знание степени повреждения в концентраторах напряжений, таких как отверстия и выемки, важно при инженерном проектировании, поскольку оно влияет на величину локализованных напряжений в месте разрушения и, следовательно, на прочность компонента или конструкции в области надреза.

Существуют определенные проблемы, связанные с точным определением механических характеристик материалов на растяжение при высоких температурах. Традиционно высокотемпературное поведение конструкционного материала при растяжении получают путем проведения экспериментов в хорошо контролируемых условиях при измерении деформации с помощью экстензометров [6; 7]. Экстензометр относится к контактным методам, которые обеспечивают среднее измерение по заданной расчетной длине. Хотя эта методика дает приемлемые результаты и широко используется в инженерных приложениях, точность измерения деформации будет сильно зависеть от используемого в эксперименте оборудования. С одной стороны, в тех случаях, когда наличие локальных изменений приводит к значительной локализации деформации, измерения деформации с помощью экстензометра могут не зафиксировать эти изменения [8]. С другой стороны, термостойкие тензорезисторы обеспечивают надежные измерения деформации при значительно высоких температурах с возможностью измерения локализации деформации. Однако применение таких термостойких тензодатчиков ограничивается точечными измерениями и относительно более низкими рабочими температурами [9–11].

Недавние достижения в области бесконтактных измерений полного поля доказали свою надежность в качестве альтернативы традиционным методам испытания материалов при повышенных температурах. В частности, метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) (англ. digital image correlation) на базе бесконтактной трёхмерной цифровой оптической системы является одним из наиболее перспективных методов, позволяющих получить точную информацию о деформационном отклике материалов, находящихся в экстремальных ус-

ловиях [12]. Трехмерная DIC (3D-DIC) имеет возможность регулировки пространственного разрешения, возможность проводить измерения на искривленных поверхностях и на образцах различных размеров и / или форм [13–18]. Первая работа в этой области была выполнена Lyons et al. [19] в 1996 г. на металлах. В этом исследовании авторы провели серию экспериментов для оценки возможностей 2D DIC в измерении деформаций полного поля при повышенных температурах. Были обнаружены особенности применения системы 2D DIC в условиях повышенных температур, такие как искажение изображения, изменение контраста и интенсивности спекл-картины и т.п. Что подтверждается и более поздними работами [20; 21], где также отмечены ограничения, связанные с ухудшением влияния экстремальных температур на спекл-картину.

Среди существующих методов, используемых для регистрации локализаций или идентификации повреждений, в работе был рассмотрен метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) из-за его мобильности, высокой точности и возможности измерения всего поля исследования даже при высоких температурах [22–24]. В литературе встречается много источников, касающихся применения цифровой корреляции изображений при комнатной температуре, но основная идея работы заключалась в том, чтобы адаптировать технику КЦИ для высокотемпературных механических испытаний композиционных материалов, для которых в литературе практически нет публикаций [25–29].

1. Материал, оборудование и методика механического испытания

Испытания проводились в центре коллективного пользования Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5882

при совместном использовании бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D и метода корреляции цифровых изображений (КЦИ). В состав электромеханической испытательной системы входит термокамера с рабочим диапазоном температур от -100 до $+350$ °С. Через окно в термокамере становится возможным реализовать съемку видеосистемой всей поверхности испытуемого образца. В качестве независимого метода измерения деформации применялся осевой динамический экстензометр Instron 2620-601 с измерительной базой 50 мм и максимально возможным отклонением от измеряемой величины 0,15 %. Регистрация деформации на композитном образце осуществлялась с одной стороны с помощью системы Vic-3D, а с обратной стороны – навесным экстензометром. Общий вид проведения испытания при совместном использовании бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D и навесного экстензометра представлен на рис. 1.

На точность бесконтактной оптической системы влияют технические характеристики объективов и цифровых камер, а именно чувствительность матрицы, разрешающая способность и возможная частота съемки. Испытания проводились с использованием камер Prosilica 50 мм (разрешающая способность 4872×3248 , 16 Мп), максимальная частота съемки при максимальном разрешении 3 кадра в секунду. В данной работе используется критерий нормированной суммы квадратов разностей с нулевым средним, так как он наименее чувствителен к изменению освещения в ходе испытания. В ходе постобработки системой Vic-3D осуществлялось вычисление компонент деформаций с помощью тензора конечных деформаций в представлении Лагранжа.

Исследования проводились на конструкционных стекло- и углепластиках. Для отработки вопросов точности измерений, влияния повышенной температуры на целостность мелкодисперсного покрытия в ненагруженном состоянии и влияния повышенной температуры на построение полей деформаций в объектах

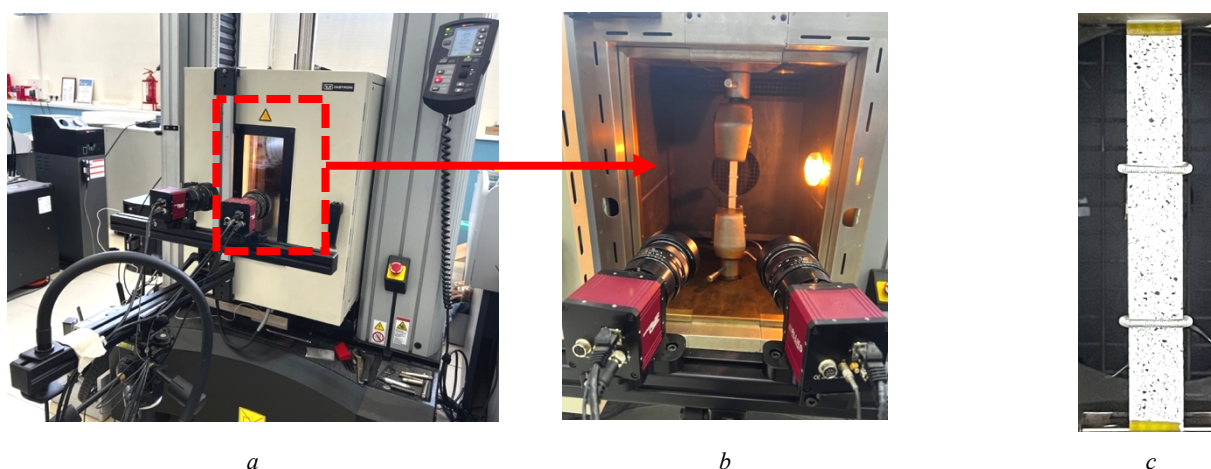


Рис. 1. Общий вид проведения испытания (а), образец в термокамере и пара цифровых камер (б), образец с навесным экстензометром (с)

Fig. 1. General view of the test (a), a sample in a heat chamber and a pair of digital cameras (b), a sample with a mounted extensometer (c)

с концентраторами были использованы стеклотекстолит СТЭФ (СТЭФ – это слоистый армированный стеклопластик, полученный методом горячего прессования стеклотканей, пропитанных термореактивным связующим на основе совмещенных эпоксидной и фенолформальдегидной смол) и углепластик на основе препрега ВКУ 39 и связующего ВСЭ, полученный методом автоклавного прессования.

Испытания СТЭФ проводились на образцах в виде полосок без отверстия и с отверстием, размерами $250 \times 18 \times 5$ мм (отверстие диаметром 3 мм). Испытания углепластика ВКУ 39 осуществлялись на образцах в виде полосок с отверстием, размерами $250 \times 50 \times 3$ мм (отверстие диаметром 6 мм). При всех испытаниях скорость перемещения траверсы составляла 2 мм/мин. Центральное отверстие образцов были просверлено с использованием вертикальных сверл. Нагружение производилось до значения нагрузки 10 кН для СТЭФ и до 20 кН для углепластика, образцы до разрушения не доводили. На рис. 2 показан образец с увеличенным изображением спекл-структуры в интересующей области и геометрия образца. Все размеры на рис. 2 приведены в мм.

Программа исследований включала в себя шесть этапов. На первом этапе проводилось предварительное испытание образца стеклотекстолита в термокамере с навесным экстензометром при комнатной температуре (1-й этап). На следующем этапе проводилось испытание образца стеклотекстолита/углепластика с отверстием в термокамере при комнатной температуре 22°C (2-й этап). На третьем этапе – испытание образца стеклотекстолита/углепластика с отверстием в термокамере при температуре 100°C (3-й этап). На четвертом этапе – испытание образца углепластика с отверстием в термокамере

при температуре 120°C (4-й этап). На пятом этапе – испытание образца углепластика с отверстием в термокамере при температуре 200°C (5-й этап). На шестом этапе – испытание образца углепластика с отверстием в термокамере при температуре 300°C (6-й этап). Для обеспечения однородного температурного поля при достижении заданной температуры в термокамере производилось термостатирование в течение 2 ч. На каждом этапе осуществлялась съемка видеосистемой через стекло термокамеры.

2. Методические особенности использования видеосистемы

В ходе исследования было выделено несколько факторов, которые оказались важными для получения достоверных данных. На точность влияет качество поверхности образца. Перед испытаниями до нагружения объекта на поверхность необходимо нанести мелкодисперсное покрытие, спекл-структуру, с помощью которого обеспечивается достоверное определение перемещений и повышается контрастность исследуемой поверхности. На поверхность образца наносилась совокупность черных и белых точек с помощью аэрозольной краски Kudo – термостойкая эмаль (кремний органическая). Максимальная рабочая температура, заявленная производителем, 650°C . Также использовалась нетемпературная акриловая аэрозольная краска Decorig.

Важным фактором также является выравнивание образца, выравнивание камеры по отношению к образцу, стабильность камеры. Учитывая, что образец находится в термокамере, возникают трудности с реализацией

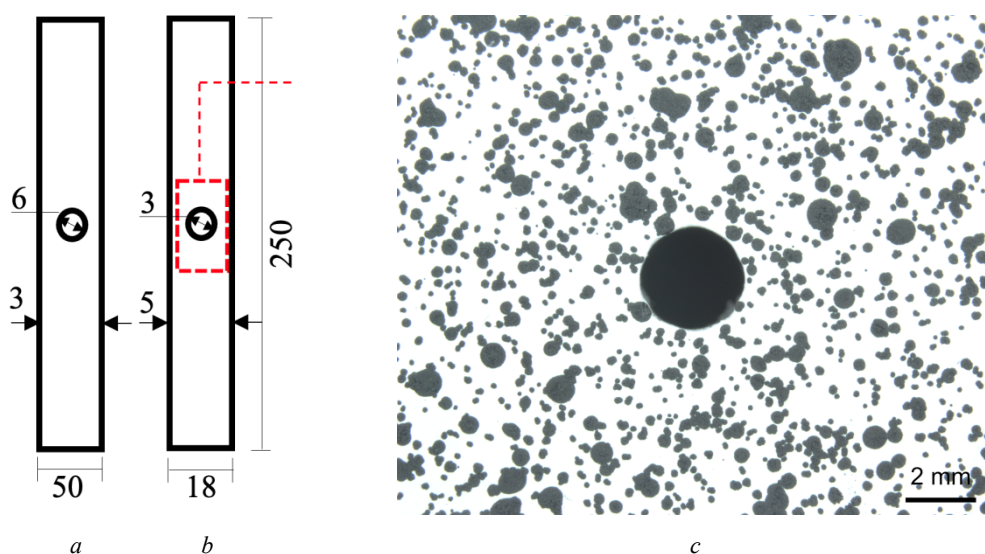


Рис. 2. Геометрия образца (*a* – углепластик, *b* – СТЭФ) при растяжении с увеличенным изображением интересующей области в методе КЦИ – *c*

Fig. 2. Sample geometry (*a* – carbon fiber, *b* – STEF) under tension with an enlarged image of the region of interest in the DIC method – *c*

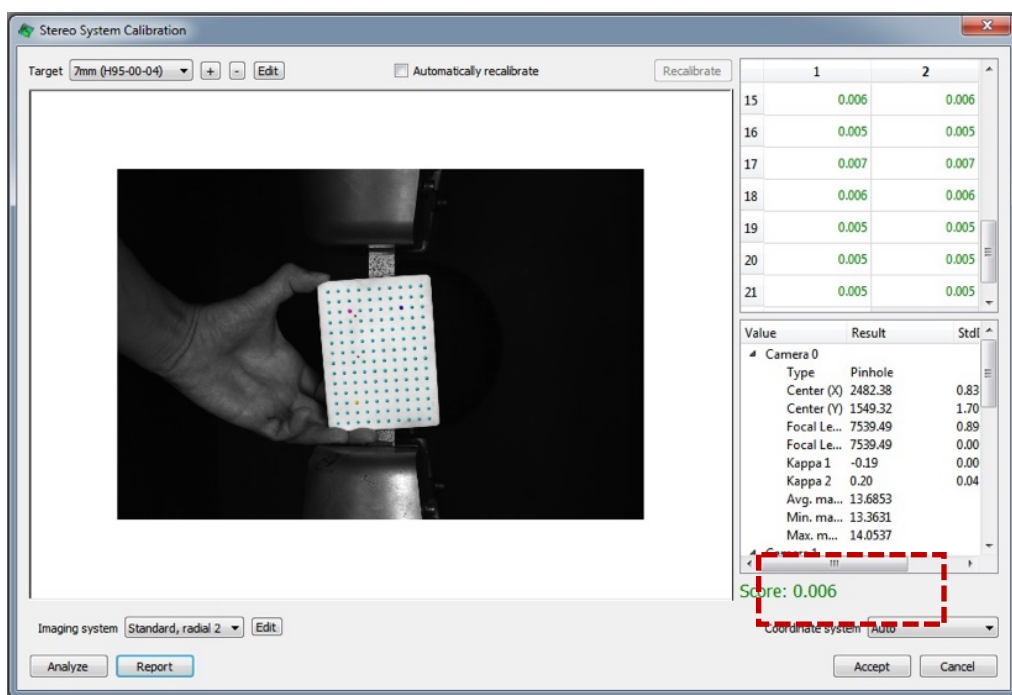
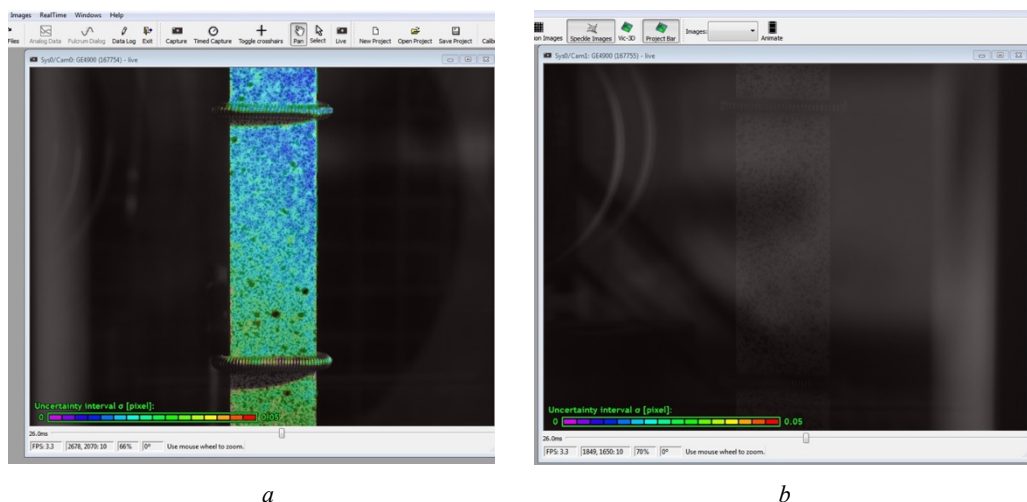


Рис. 3. Процесс калибровки

Fig. 3. Calibration process



a

b

Рис. 4. Фотографии из системы Vic-Snap, снятые после настройки освещения: *a* – освещение изнутри камеры, *b* – внешнее освещение

Fig. 4. Photos from the Vic-Snap system taken after lighting adjustment: *a* – lighting from inside the camera, *b* – external lighting

данного этапа. Расстояние между камерой и образцом необходимо обеспечить таким, чтобы образец полностью заполнял поле обзора камеры. После размещения камер и выполнения проверки точности фокуса и апертуры необходимо произвести калибровку. С этого момента изменение параметров системы камер может нарушить калибровку, поэтому все настройки должны быть тщательно зафиксированы. Правильная калибровка камер оказывает существенное влияние на эффективность работы всей системы. На рис. 3 представлена фотография, иллюстрирующая процесс калибровки системы камер. Ошибка составляет 0,006, данный результат свидетельствует о качественно проведенной калибровке системы.

Освещение, съемка через стекло и качество изображения играют особую роль. Наличие бликов на стекле термокамеры может отрицательно сказаться на точности расчетных полей деформации [30]. Стоит также отметить, что указанную проблему необходимо решать при проведении не только температурных испытаний, но и экспериментов с использованием защитного экрана на испытательной машине. Зачастую при исследовании, например, горных пород или при испытаниях на одноосное сжатие, наличие защитного экрана необходимо во избежание травм оператора и повреждения камер видеосистемы.

Во время эксперимента образец освещался обычным белым светом изнутри камеры. В качестве примера на рис. 4 (*a*, *b*) представлены фотографии из системы

Vis-Snap, снятые после настройки освещения. На них можно наблюдать распределение неопределенности (англ. uncertainty interval). На рис. 4, а, освещение производилось изнутри термокамеры и снаружи, в данном случае $\text{uncertainty interval} = 0,02$, что является допустимым значением. В качестве внешнего освещения использовались переносные лампы. Внутри термокамеры установлена стационарная лампа накаливания 40 Вт. На рис. 4, б, освещение только внешнее, образец и область с мелкодисперсным покрытием не фиксируется видеосистемой, полученный результат наглядно демонстрирует недостаточный уровень освещенности рабочей части испытуемого образца.

Для проверки точности измерения деформации методом DIC продольная деформация, рассчитанная по «виртуальному» экстензометру, сравнивалась с продольной деформацией, полученной с помощью навесного экстензометра. Измерительная база в обоих случаях составляла 50 мм. Диаграмма деформирования для образца стеклотекстолита представлена рис. 5.

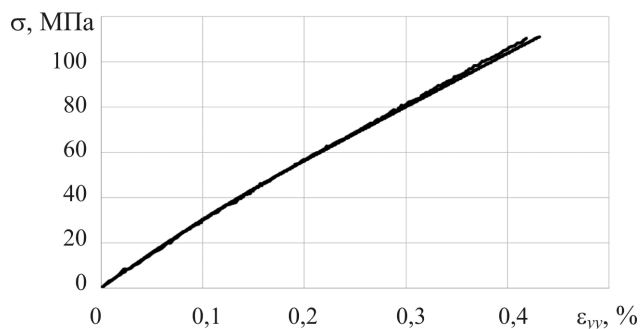


Рис. 5. Диаграмма деформирования образца стеклотекстолита (первый этап): данные с навесного экстензометра показаны сплошной линией; данные с видеосистемы показаны пунктирной линией

Fig. 5. Diagram of deformation of a fiberglass sample (first stage): data from a mounted extensometer are shown by a solid line; data from the video system is shown by a dotted line

Максимальное отклонение значений, полученных с навесного экстензометра, и значений с видеосистемы составило менее 2 % при максимальном уровне напряжения 100 МПа.

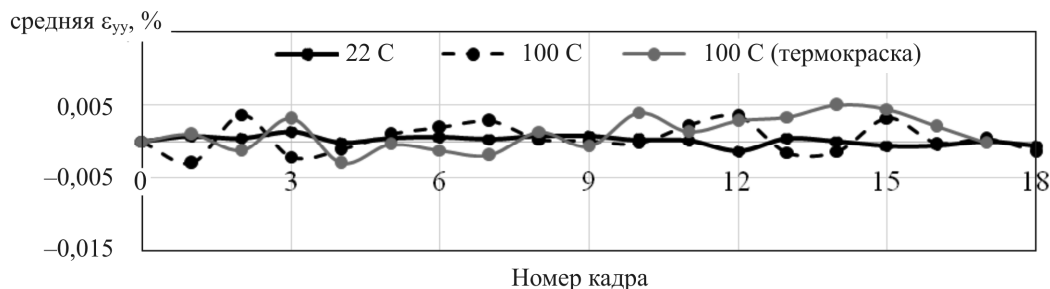


Рис. 6. Изменение среднего значения деформаций на стационарных изображениях, снятых в условиях отсутствия нагрузки при разных температурах

Fig. 6. Change in the average value of deformations in stationary images taken under no load conditions at different temperatures

3. Результаты и обсуждение

С помощью мелкодисперсного покрытия, нанесенного на поверхность, обеспечивается достоверное определение перемещений и повышается контрастность исследуемой поверхности. Для оценки эффективности измерения деформации получены средние значения продольной деформации (средняя ϵ_{yy}) в зависимости от номера кадра при отсутствии нагрузки (рис. 6). При каждой температуре был сделан набор из 18 стационарных изображений исследуемой области для образца стеклотекстолита СТЭФ.

Ожидается, что в результате мы получим нулевые значения по всей интересующей области (рис. 6). Однако изображения, полученные с образцов без деформации, показывают характер деформации в виде случайно распределенного шума. Кривая средней деформации в термокамере при комнатной температуре указывает на незначительные ненулевые значения. Кривые, полученные в термокамере при температуре, указывают на изменчивость деформации порядка нескольких тысячных деформаций, максимальное отклонение составляет 0,005 %. Стоит учитывать задачу исследования: когда измеренный шум деформации значительно меньше, чем фактически приложенная деформация, то им можно пренебречь. Однако в случаях, когда эти уровни шума важны, например, при измерении модуля упругости в условиях высоких температур, могут потребоваться такие подходы, как осреднение деформаций для минимизации шума. Другой подход заключается в выполнении пространственного сглаживания данных деформации для уменьшения шума [31]. Пространственное сглаживание может быть легко реализовано несколькими способами, например, фильтры больших деформаций, используемые по требованию в математическом аппарате метода КЦИ [12]. Из-за незначительного влияния уровней деформационного шума на наши окончательные результаты пространственное сглаживание в настоящей работе не проводится.

На рис. 7 представлены поля неоднородных деформаций для стеклотекстолита СТЭФ с отверстием в термокамере при комнатной температуре 22 °C (второй

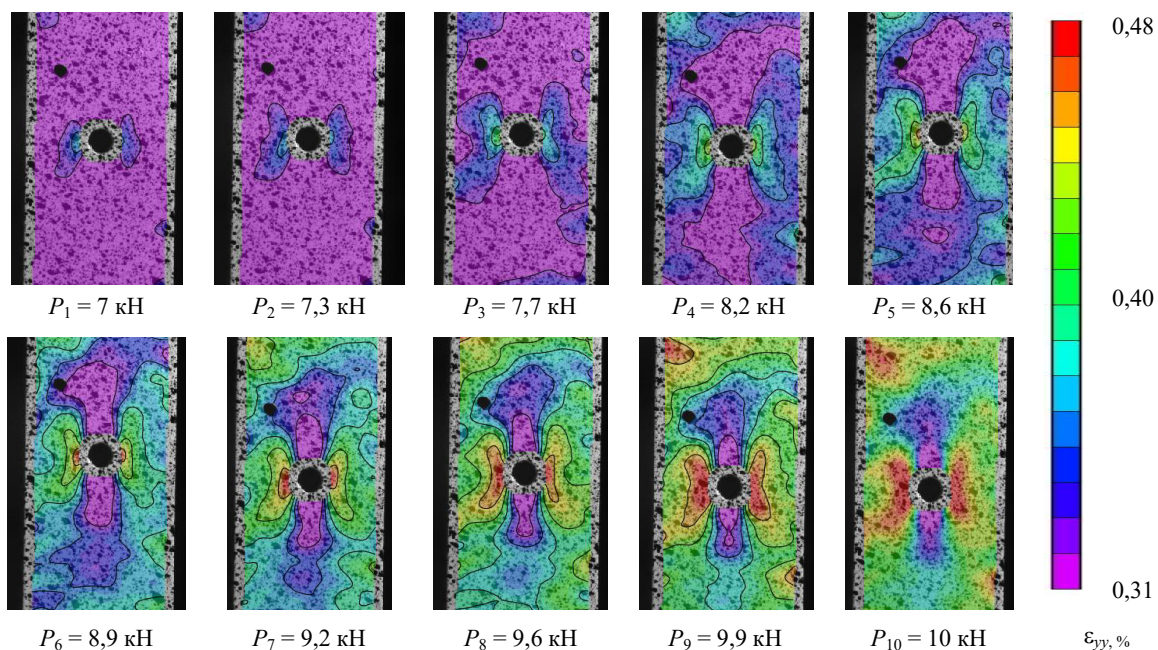


Рис. 7. Поля продольных деформаций на поверхности стеклотекстолита с отверстием в термокамере при комнатной температуре 22 °С

Fig. 7. Fields of longitudinal deformations on the surface of fiberglass with a hole in the heat chamber at room temperature 22 °C

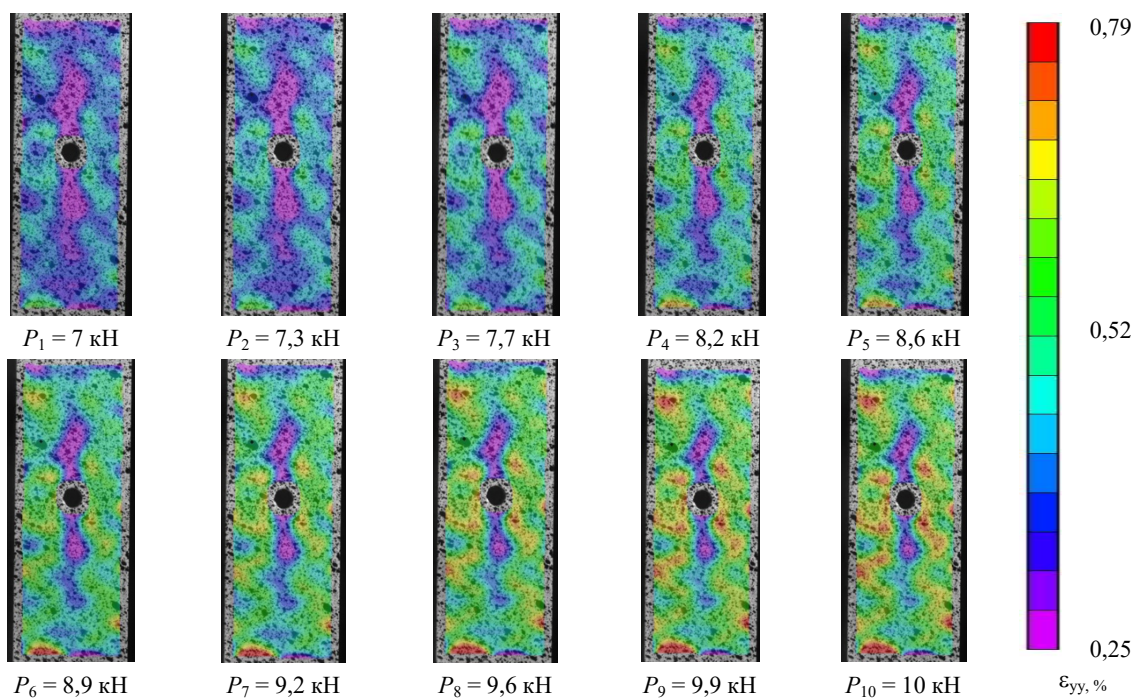


Рис. 8. Поля продольных деформаций на поверхности стеклотекстолита с отверстием в термокамере при температуре 100 °С

Fig. 8. Fields of longitudinal deformations on the surface of fiberglass with a hole in the heat chamber at a temperature of 100 °C

этап). Начало координат установлено в середине рабочей части образца. При этом ось Oy направлена вдоль образца (вдоль оси растяжения), ось Ox – перпендикулярно оси нагружения в плоскости образца. Форма зоны максимальных деформаций не меняется, она просто увеличивается в размерах по мере нагружения образца.

На рис. 8 представлены поля неоднородных деформаций для стеклотекстолита СТЭФ с отверстием в термокамере при температуре 100 °С (третий этап). По мере увеличения нагрузки происходит формирование зон

с максимальными и минимальными уровнями деформации. Полученные поля иллюстрируют высокую концентрацию деформаций с левой и с правой сторон от отверстия и низкую с верхней и нижней сторон в направлении действия приложенной нагрузки. Как видно из полученных результатов (см. рис. 7 и 8), уровень деформаций при конкретной приложенной растягивавшей нагрузке увеличивается по мере повышения температуры.

Регистрация продольной деформации осуществлялась с использованием дополнительного модуля про-

граммного обеспечения видеосистемы «виртуальный экстензометр». Принцип его действия аналогичен навесному экстензометру и заключается в отслеживании взаимного смещения между двумя точками на поверхности образца в соответствии с прикладываемым усилием. Основными преимуществами использования «виртуального экстензометра» являются: бесконтактная регистрация деформаций, благодаря чему исключается механическое воздействие на поверхность образца; возможность использования нескольких экстензометров на одном образце, что в свою очередь повышает точность регистрируемых данных [32]. В работе на поверхность образца в программном обеспечении Vic-3D были нанесены два «виртуальных экстензометра» в соответствии с рис. 9. При получении результатов значений перемещений и деформаций рассчитывались средние значения с двух указанных «виртуальных экстензометров».

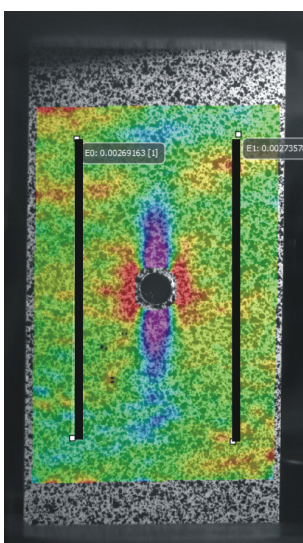


Рис. 9. Принцип расположения «виртуальных экстензометров» в программном обеспечении Vic-3D

Fig. 9. The principle of the location of "virtual extensometers" in the software Vic-3D

Использование видеосистемы позволяет проанализировать поля деформаций в окрестности концентратора, в связи с этим для композитных образцов проведен анализ распределения продольной деформации (ϵ_{yy}) на поверхности вдоль линии L , проведенной по всей ширине образца через отверстие (рис. 10). Дополнительный инструмент видеосистемы «линия (L)» использован для определения средних деформаций по линии осреднения, данный инструмент удобен для оценки степени неоднородности деформаций.

Эпюры деформаций построены для образца стеклопластика СТЭФ при уровне нагрузки 7 кН (см. рис. 10), для образца углепластика при уровне нагрузки 12 кН (рис. 11). По результатам сравнивалось поведение кривых продольных деформаций в зависимости от вида краски и производилась оценка деформаций с учетом уровня температуры. На графиках буквой Т отмечена термостойкая эмаль.

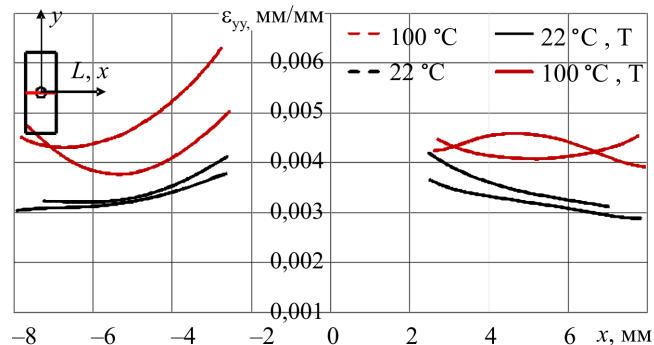


Рис. 10. Эпюры продольных деформаций ϵ_{yy} на поверхности образца стеклотекстолита СТЭФ при уровне нагрузки 7 кН

Fig. 10. Diagrams of longitudinal deformations ϵ_{yy} on the surface of a STEF fiberglass sample at a load level of 7 kN

Как видно из полученных данных (см. рис. 10), все кривые имеют сглаженный вид без неоднородностей. При комнатной температуре наблюдается незначительная разница регистрируемых данных деформации в зависимости от вида краски, максимальная разница вблизи отверстия составляет 12 %. При повышении температуры присутствуют значимая разница в регистрируемых данных и максимальная разница 23 %. Регистрируемые значения деформаций для термостойкой краски (Т) выше, чем для нетермостойкой и при комнатной, и при повышенной температуре.

На поверхности образца углепластика отмечаются пики деформаций у отверстия (см. рис. 11). По мере увеличения температуры возрастает степень неоднородности, что сильнее заметно при использовании нетемпературной краски. Кривые, полученные с использованием термостойкой краски (Т), имеют более сглаженный вид.

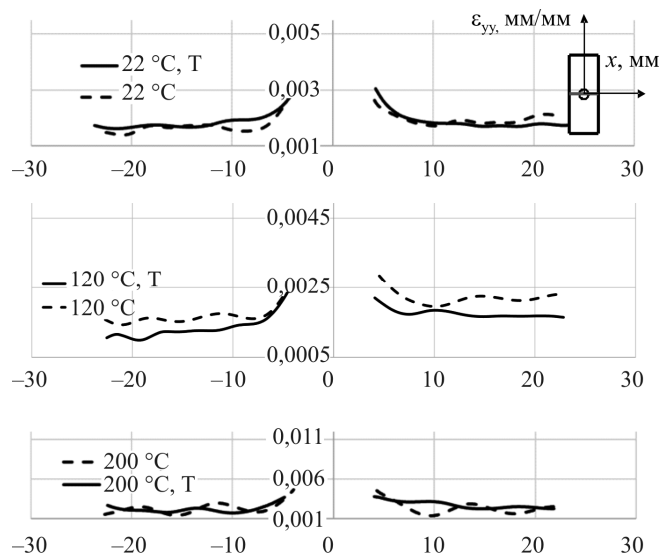


Рис. 11. Эпюры продольных деформаций ϵ_{yy} на поверхности образца углепластика при уровне нагрузки 12 кН

Fig. 11. Plots of longitudinal deformations ϵ_{yy} on the surface of a carbon fiber sample at a load level of 12 kN

На рис. 12 представлены диаграммы деформирования для образца стеклопластика СТЭФ при комнатной температуре 22 °С и при повышенной 100 °С для разных красок: термостойкой (Т) и нетермостойкой. Значение среднего напряжения σ определялось как отношение приложенной силы к толщине образца (h) и ширине образца (t) за вычетом диаметра (d).

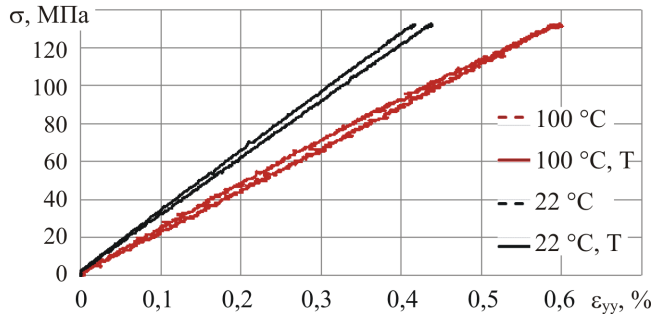


Рис. 12. Диаграмма деформирования образца стеклотекстолита СТЭФ при разных уровнях температуры

Fig. 12. Diagram of deformation of STEF fiberglass sample at different temperature levels

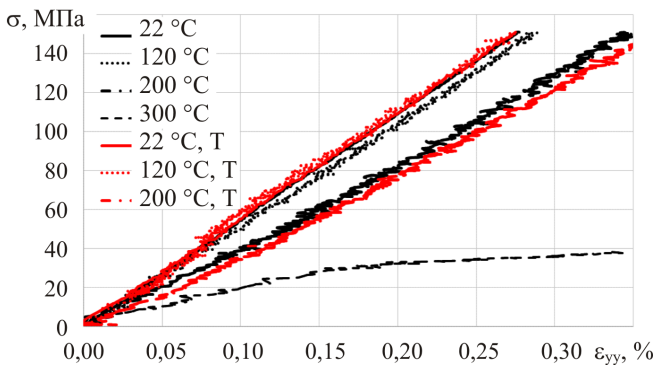


Рис. 13. Диаграмма деформирования для образца углепластика при разных уровнях температуры

Fig. 13. Deformation diagram for a carbon fiber sample at different temperature levels

Полученные результаты (см. рис. 12) свидетельствуют, что по мере нагрева образца происходит рост уровня деформаций. Максимальное отклонение деформаций для термостойкой (Т) и нетермостойкой краски при температуре 100 °С составляет 22 %. При комнатной температуре 22 °С составляет 6 %. В обоих случаях значения деформации с термостойкой краской (Т) выше, чем с нетермостойкой.

На рис. 13 представлены диаграммы деформирования для образцов углепластика при комнатной температуре 22 °С и при повышенных 100, 120, 200 и 300 °С для разных красок термостойкой (Т) и нетермостойкой.

По мере увеличения температуры регистрируемые значения деформации носят все более неоднородный характер, о чем свидетельствуют прерывистые кривые на рис. 13 (температуры выше комнатной). При комнатной температуре кривые линейные и совпадают между собой для разных красок термостойкой (Т) и нетермостойкой. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что выбор краски в указанном диапазоне температур не влияет на регистрацию деформаций на поверхности образца из углепластика.

В качестве примера на рис. 14 представлены фотографии разрушенного образца углепластика при максимальной температуре 300 °С. Образец при указанной температуре разрушился при нагрузке, равной 5,7 кН. Нетермостойкая краска не потеряла своих свойств, но приобрела желтоватый оттенок, мелкодисперсное покрытие не искажилось, не изменило контраст и интенсивность. В области больших деформаций вокруг отверстия с обеих сторон наблюдается разрыв волокон. Продольные трещины матрицы инициировались в смоляных каналах и карманах, где присутствует концентрация деформации, и распространялись по всей длине образца от отверстия к краю образца, вдоль приложения нагрузки. Продольный разрыв вызвал дальнейшее расслоение между жгутами основы и утка и в конечном счете привел к полному разрушению матрицы.

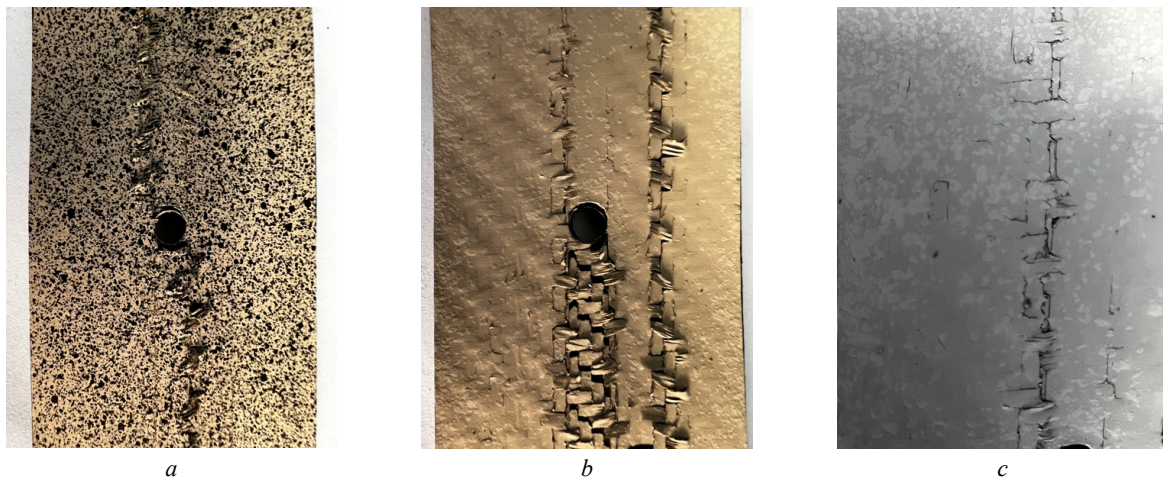


Рис. 14. Фотографии разрушенного образца углепластика при температуре 300 °С: *a* – мелкодисперсное покрытие, *b* – обратная сторона образца, *c* – увеличенная зона повреждения

Fig. 14. Photographs of a destroyed carbon fiber sample at a temperature of 300 °С: *a* – finely dispersed coating, *b* – reverse side of the sample, *c* – enlarged damage zone

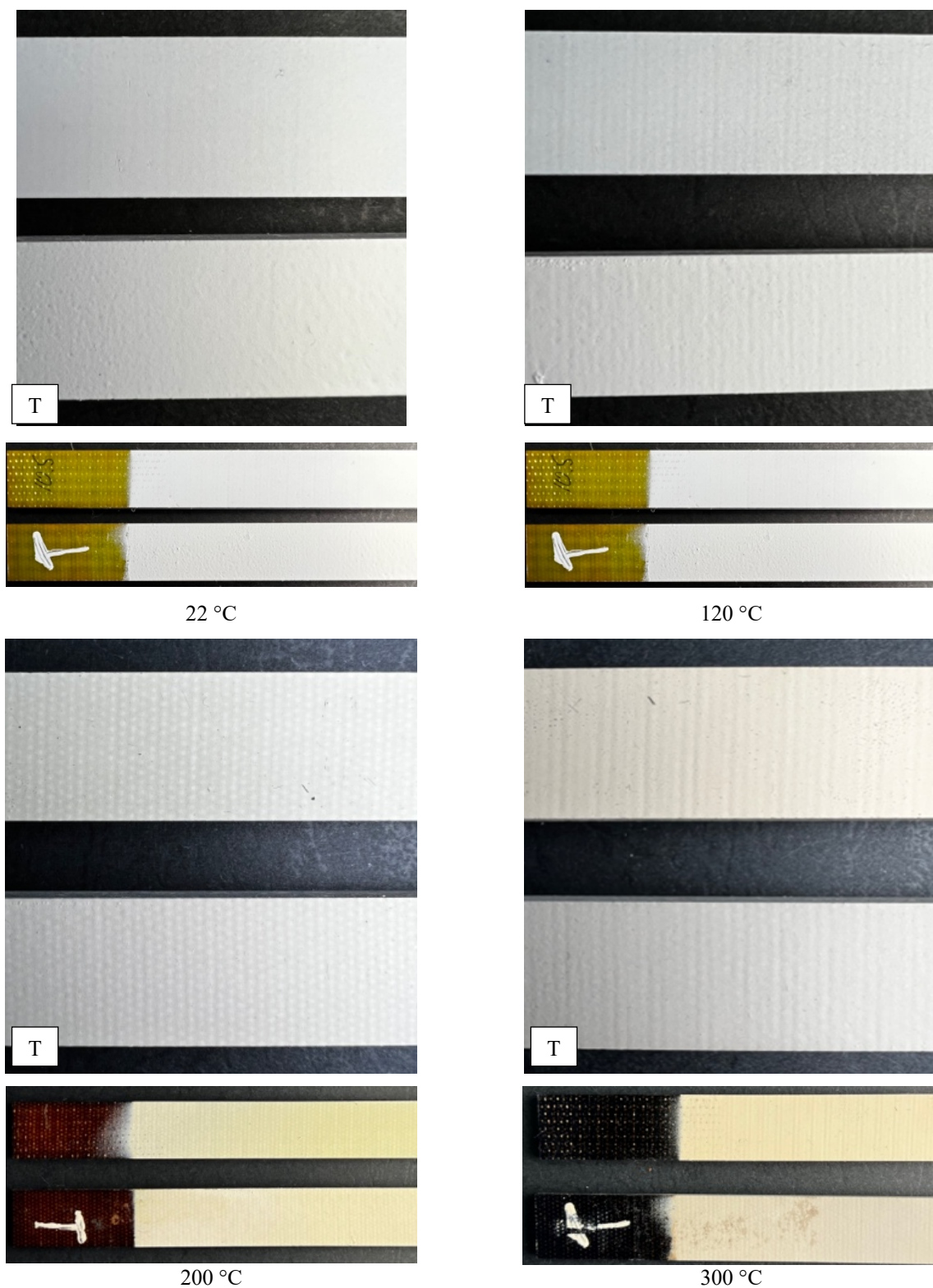


Рис. 15. Фотографии образцов, полученные на каждом этапе температурных испытаний

Fig. 15. Photographs of samples obtained at each stage of temperature testing

Для оценки поведения белого покрытия дополнительно в термокамеру без нагрузки укладывали два образца стеклопластика СТЭФ. На один образец была нанесена нетермостойкая аэрозольная краска. На другой образец – термостойкая эмаль (Т). На каждом этапе экспериментальных исследований образцы доставали из термокамеры и производили фотосъемку поверхности.

На рис. 15 представлены фотографии образцов, буквой Т отмечена термостойкая эмаль.

Из полученных данных (рис. 15) можно отметить, что изначально термостойкая эмаль имела более вязкую структуру и наносилась более густым слоем, чем нетермостойкая. По мере нагрева постепенно проявляется структурная неоднородность материала, что становится

заметно через краску. При достижении температуры в 200°C белое покрытие начинает желтеть у обеих красок. У нетермостойкой краски это выражено сильнее, но на работу метода КЦИ это не влияет. При качественной оценке покрытий при проведении статических испытаний на растяжение при нормальной и повышенных температурах предпочтение отдано нетермостойкой краске, так как разницы между зафиксированными видеосистемой данными, полученными при использовании двух красок, практически нет, но нетермостойкая краска более экономически выгодный вариант.

Заключение

В ходе работы установлено, что разброс регистрируемых значений деформаций внутри термокамеры

Библиографический список

1. Touchard-Lagattu F., Lafarie-Frenot M.C. Damage and inelastic deformation mechanisms in notched TS and TP laminates // *Comp S. C Tech* 1996. – Vol. 56 (5). – P. 557e68.
2. Awerbuch J., Madhukar M.S. Notched strength of composite laminates: predictions and experiments ϵ a review // *J Reinf Plast Comp.* – 1985. – Vol. 4. – P. 3e159.
3. Lobanov D.S., Zubova E.M. Temperature aging effects on mechanical behavior of structural GFRP on interlaminar shear tests // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* – 2020. – Vol. 747. 012119. DOI: 10.1088/1757-899X/747/1/012119.
4. Cowley K.D., Beaumont P.W.R. Damage accumulation at notches and the fracture stress of carbon-fibre/polymer composites: combined effects of stress and temperature // *Comp S. C Tech.* – 1997. – Vol. 57 (9e10). – P. 1211e9.
5. Wisnom M., Hallett S.R., Soutis C. Scaling effects in notched composites // *J Compos Mater.* – 2010. – Vol. 44. – P. 195e210
6. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature // *Proceedings of the 7th international symposium on ballistics.* – 1983. – P. 541–7.
7. Lin Y.C., Chen X., Liu G. A modified Johnson-Cook model for tensile behaviors of typical high-strength alloy steel // *Mater Sci Eng A.* – 2010. – Vol. 527. – P. 6980–6.
8. Parsons E., Boyce M.C., Parks D.M. An experimental investigation of the large-strain tensile behavior of neat and rubber-toughened polycarbonate // *Polymer.* – 2004. – Vol. 45. – P. 2665–84.
9. Sharpe W.N. Strain gages for long-term high-temperature strain measurement. *Exp Mech.* – 1975. – Vol. 15 (12). – P. 482–8.
10. High temperature strain gages based on reactively sputtered AlN_x thin films / O.J. Gregory, A.B. Slot, P.S. Amons, E.E. Crisman // *Surf Coat Technol.* – 1996. – Vol. 88. – P. 79–89.
11. Materials for high temperature acoustic and vibration sensors: a review / R.C. Turner, P.A. Fuierer, R.E. Newnham, T.R. Shrout // *Appl Acoust.* – 1994. – Vol. 41 (4). – P. 299–324.
12. Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements. – New York: Springer, 2009.
13. In-situ noncontact measurement system for nozzle throat deformation in high-temperature gas heating via laser speckle digital image correlation with wavelet smoothing of displacement field

двумя независимыми методами измерений: с навесного экстензометра и видеосистемы, не превышает 2 %. Проведена серия испытаний на растяжение при нормальной и повышенной температуре на образцах стеклотекстолита (22° и 100 °C) и углепластика (22°, 120°, 200° и 300 °C). В ходе работы предложены рекомендации по использованию видеосистемы для температурных механических испытаний. Установлены внешние факторы, критически влияющие на точность измерений видеосистемой. Их учёт может привести к ряду неоспоримых преимуществ использования бесконтактной видеосистемы на всем рабочем температурном диапазоне. Проведена сравнительная оценка мелкодисперсного покрытия, получаемого на основе использования аэрозольных красок разных производителей и для разных температурных режимов.

- / Fujia Liu, Jianhong Yang, Qianqian Wang, Yang Liu, Hongsen Wang // *Measurement.* – 2022. – Vol. 201. – P. 111696.
14. Liping Yu, Bing Pan Time-gated active imaging digital image correlation for deformation measurement at high temperatures // *Extreme Mechanics Letters.* – 2022. – Vol. 54. – P. 10176.
15. Deformation measurement in Al thin films at elevated temperatures by digital image correlation with speckles prepared by femtosecond laser / Zhiwen Chen, Guoliang Xu, Qiang Cao, Meng Ruan, Sheng Liu, Huiming Pan, Li Liu // *Optics & Laser Technology.* – 2022. – Vol. 155. – P. 108339.
16. Improvement method of high-temperature digital image correlation measurement accuracy based on image processing / Huanqing Wang, Pengxiang Ge, Shuang Wu, Biao Wang, Yonghong Wang, Xiangsen Kong, Yafei Pang // *Measurement.* – 2022. – Vol. 190. – P. 110723.
17. Unveiling damage mechanisms of chromium-coated zirconium-based fuel claddings at LWR operating temperature by in-situ digital image correlation / David C. Roache, Clifton H. Bumgardner, Timothy M. Harrell, Morgan C. Price, Alex Jarama, Frederick M. Heim, Jorie Walters, Benjamin Maier, Xiaodong Li // *Surface and Coatings Technology.* – 2022. – Vol. 429. – P. 127909.
18. In situ measurements of the high-temperature mechanical properties of ZrO₂-doped YTaO₄ ceramic by three-point bending combined with a digital image correlation method / Z.P. Zhou, W.Z. Yuan, W. Zhu, X.P. Hu, Y. Zou, Q. Wu, H.Q. Wei // *Ceramics International.* – 2022. – Vol. 48, iss. 5. – P. 7159–7167.
19. Lyons J.S., Liu J., Sutton M.A. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation // *Exp Mech.* – 1996. – Vol. 36 (1). – P. 64–70.
20. Wu L, Zhu J, Xie H. Single-lens 3D digital image correlation system based on a bilateral telecentric lens and a bi-prism: validation and application // *Appl Opt.* – 2015. – Vol. 54 (26). – P. 7842–50.
21. Thermo-mechanical properties of metals at elevated temperatures / B. Koohbor, G. Valeri, A. Kidane, M.A. Sutton // *Adv Opt Methods Exp Mech.* – 2015. – Vol. 3. – P. 117–23. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-22446-6_15.
22. Strungar E.M., Lobanov D.S. Mathematical data processing according to digital image correlation method for polymer composites // *Frattura ed Integrità Strutturale.* – 2020. – Vol. 54. – P. 56–65. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.54.04

23. Strungar E.M., Wildemann V.E., Lobanov D.S. Application of the digital image correlation method for the solution of fiber optical technologies problems // AIP Conference Proceedings. 28TH Russian conference on mathematical modelling in natural sciences. – 2020. – Vol. 2216. – P. 080006. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0003551>

24. Comprehensive analysis of mechanical behavior and fracture processes of specimens of three-dimensional reinforced carbon fiber in tensile tests / T.V. Tretyakova, A.N. Dushko, E.M. Strungar, E.M. Zubova, D.S. Lobanov // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2019. – № 1. – P. 173–183. DOI: 10.15593/permech/2019.1.15

25. High-temperature strain field measurement using digital image correlation / B.M.B. Grant, H.J. Stone, P.J. Withers, M. Preuss // J Strain Anal Eng Des. – 2009. – Vol. 44 (4). – P. 263e71.

26. High-temperature digital image correlation method for full-field deformation measurement captured with filters at 2600 °C using spraying to form speckle patterns / X. Guo, J. Liang, Z. Tang, B. Cao, M. Yu // Opt Eng. – 2014. – Vol. 53 (6). – P. 1e12.

27. Vieille B., Albour W., Taleb L. Viscoelastic viscoplastic model for aeronautical thermoplastic laminates at high temperature: Validation on high stress gradient structures // Composites Part B: Engineering. – 2016. – Vol. 90. – P. 278–286.

References

1. Touchard-Lagattu F, Lafarie-Frenot MC. Damage and inelastic deformation mechanisms in notched TS and TP laminates. *Comp S. C Tech* 1996; 56 (5): 557e68.

2. Awerbuch J, Madhukar MS. Notched strength of composite laminates: predictions and experiments e a review. *J Reinf Plast Comp* 1985; 4: 3e159.

3. Lobanov D.S. Zubova E.M. Temperature aging effects on mechanical behavior of structural GFRP on interlaminar shear tests. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – 747. 012119. doi: 10.1088/1757-899X/747/1/012119.

4. Cowley KD, Beaumont PWR. Damage accumulation at notches and the fracture stress of carbon-fibre/polymer composites: combined effects of stress and temperature. *Comp S. C Tech* 1997; 57 (9e10): 1211e9.

5. Wisnom M, Hallett SR, Soutis C. Scaling effects in notched composites. *J Compos Mater* 2010; 44: 195e210

6. Johnson GR, Cook WH. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature. In: Proceedings of the 7th international symposium on ballistics; 1983. p. 541–7.

7. Lin YC, Chen X, Liu G. A modified Johnson-Cook model for tensile behaviors of typical high-strength alloy steel. *Mater Sci Eng A* 2010; 527: 6980–6.

8. Parsons E, Boyce MC, Parks DM. An experimental investigation of the large-strain tensile behavior of neat and rubber-toughened polycarbonate. *Polymer* 2004; 45: 2665–84.

9. Sharpe WN. Strain gages for long-term high-temperature train measurement. *Exp Mech* 1975; 15 (12): 482–8.

10. Gregory OJ, Slot AB, Amons PS, Crisman EE. High temperature strain gages based on reactively sputtered AlN_x thin films. *Surf Coat Technol* 1996; 88: 79–89.

11. Turner RC, Fuierer PA, Newnham RE, Shrout TR. Materials for high temperature acoustic and vibration sensors: a review. *Appl Acoust* 1994; 41 (4): 299–324.

12. Sutton MA, Orteu JJ, Schreier HW. Image correlation for shape, motion and deformation measurements. *New York: Springer*; 2009.

13. Fujia Liu, Jianhong Yang, Qianqian Wang, Yang Liu, Hongsen Wang In-situ noncontact measurement system for nozzle

28. Influence of matrix nature on the post-fire mechanical behaviour of notched polymer-based composite structures for high temperature applications / B. Vieille, A. Coppalle, Y. Carpier, M.A. Maaroufi, F. Barbe // Composites Part B: Engineering. – 2016. – Vol. 100. – P. 114–124.

29. Determining the tensile response of materials at high temperature using crossmark DIC and the Virtual Fields Method / Guillermo Valeri, Behrad Koohbor, Addis Kidane, Michael A. Sutton // Optics and Lasers in Engineering. – 2017. – Vol. 91. – P. 53–61.

30. Vieille B., Aucher J., Taleb L. About the influence of temperature and matrix ductility on the behaviour of carbon woven-ply PPS or epoxy laminates: notched and unnotched laminates // Compos Sci Technol. – 2010. – Vol. 71. – P. 998e1007.

31. Pierron F., Sutton M.A., Tiwari V. Ultra high speed DIC and virtual fields method analysis of a three point bending impact test on an aluminum bar // Exp Mech. – 2011. – Vol. 51 (4). – P. 537–63.

32. Strungar, E., Lobanov, D., Wildemann, V. Evaluation of the Sensitivity of Various Reinforcement Patterns for Structural Carbon Fibers to Open Holes during Tensile Tests. *Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – P. 4287. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13244287>.

throat deformation in high-temperature gas heating via laser speckle digital image correlation with wavelet smoothing of displacement field. *Measurement*, Vol. 201, 2022, 111696

14. Liping Yu, Bing Pan Time-gated active imaging digital image correlation for deformation measurement at high temperatures. *Extreme Mechanics Letters*, Vol. 54, 2022, 10176

15. Zhiwen Chen, Guoliang Xu, Qiang Cao, Meng Ruan, Sheng Liu, Huiming Pan, Li Liu Deformation measurement in Al thin films at elevated temperatures by digital image correlation with speckles prepared by femtosecond laser. *Optics & Laser Technology*, Vol. 155, 2022, 108339

16. Huanqing Wang, Pengxiang Ge, Shuang Wu, Biao Wang, Yonghong Wang, Xiangsen Kong, Yafei Pang Improvement method of high-temperature digital image correlation measurement accuracy based on image processing. *Measurement*. Vol. 190, 2022, 110723

17. David C. Roache, Clifton H. Bumgardner, Timothy M. Harrell, Morgan C. Price, Alex Jarama, Frederick M. Heim, Jorie Walters, Benjamin Maier, Xiaodong Li Unveiling damage mechanisms of chromium-coated zirconium-based fuel claddings at LWR operating temperature by in-situ digital image correlation. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 429, 2022, 127909

18. Z.P. Zhou, W.Z. Yuan, W. Zhu, X.P. Hu, Y. Zou, Q. Wu, H.Q. Wei In situ measurements of the high-temperature mechanical properties of ZrO₂-doped YTaO₄ ceramic by three-point bending combined with a digital image correlation method. *Ceramics International*. Vol. 48, Iss. 5, 2022, pp. 7159-7167

19. Lyons JS, Liu J, Sutton MA. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation. *Exp Mech* 1996; 36 (1): 64–70.

20. Wu L, Zhu J, Xie H. Single-lens 3D digital image correlation system based on a bilateral telecentric lens and a bi-prism: validation and application. *Appl Opt* 2015; 54 (26): 7842–50.

21. Koohbor B, Valeri G, Kidane A, Sutton MA. Thermo-mechanical properties of metals at elevated temperatures. *Adv Opt Methods Exp Mech* 2015; 3: 117–23. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-22446-6_15.

22. Strungar E.M., Lobanov D.S. Mathematical data processing according to digital image correlation method for polymer

composites, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 54 (2020), 56-65. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.54.04

23. Strungar E.M., Wildemann V.E., Lobanov D.S. Application of the digital image correlation method for the solution of fiber optical technologies problems. 2020. - *AIP Conference Proceedings. 28TH Russian conference on mathematical modelling in natural sciences*. 2216, 080006 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0003551>

24. Tretyakova T.V., Dushko A.N., Strungar E.M., Zubova E.M., Lobanov D.S. Comprehensive analysis of mechanical behavior and fracture processes of specimens of three-dimensional reinforced carbon fiber in tensile tests. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 173-183. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.15

25. Grant BMB, Stone HJ, Withers PJ, Preuss M. High-temperature strain field measurement using digital image correlation. *J Strain Anal Eng Des* 2009; 44 (4): 263e71.

26. Guo X, Liang J, Tang Z, Cao B, Yu M. High-temperature digital image correlation method for full-field deformation measurement captured with filters at 2600 °C using spraying to form speckle patterns. *Opt Eng* 2014; 53 (6): 1e12.

27. B. Vieille, W. Albouy, L. Taleb Viscoelastic viscoplastic model for aeronautical thermoplastic laminates at high tempera-

ture: Validation on high stress gradient structures. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 90, 2016, Pages 278-286

28. B. Vieille, A. Coppalle, Y. Carpier, M.A. Maaroufi, F. Barbe Influence of matrix nature on the post-fire mechanical behaviour of notched polymer-based composite structures for high temperature applications. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 100, 2016, P. 114-124

29. Guillermo Valeri, Behrad Koohbor, Addis Kidane, Michael A. Sutton Determining the tensile response of materials at high temperature using crossmark DIC and the Virtual Fields Method. *Optics and Lasers in Engineering* 91 (2017) 53–61

30. Vieille B, Aucher J, Taleb L. About the influence of temperature and matrix ductility on the behaviour of carbon woven-ply PPS or epoxy laminates: notched and unnotched laminates. *Compos Sci Technol* 2010; 71: 998e1007

31. Pierron F, Sutton MA, Tiwari V. Ultra high speed DIC and virtual fields method analysis of a three point bending impact test on an aluminum bar. *Exp Mech* 2011; 51 (4): 537–63.

32. Strungar, E., Lobanov, D., Wildemann, V. Evaluation of the Sensitivity of Various Reinforcement Patterns for Structural Carbon Fibers to Open Holes during Tensile Tests. *Polymers* 2021,13,4287. <https://doi.org/10.3390/polym13244287>

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00113 (<https://rscf.ru/project/22-79-00113/>).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Financing. This work was carried out with the support of the Russian Science Foundation (Project № 22-79-00113 (<https://rscf.ru/project/22-79-00113/>)) at the Perm National Research Polytechnic University.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.