

## Применение метода корреляции цифровых изображений для оценки деформации листовой заготовки

**М. А. Петров<sup>1</sup>, В. В. Исаев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, Москва, Россия

**Аннотация.** В статье рассматривается применение метода корреляции цифровых изображений (КЦИ) при выполнении технологического испытания на штампаемость по Эриксену и одноосному растяжению алюминиевых и медных листовых заготовок соответственно. Особенностью оценки результата тестов является применение поверхностного рисунка или паттерна без дополнительного покрытия поверхности исследуемой заготовки, а также с дополнительным покрытием и хаотичным паттерном, создаваемого краской, в сочетании с параметрами настройки программы DICe, в которой выполняется сравнение снимков. Установлено, что паттерны с частым рисунком способны поддерживать непрерывность результатов по полю деформации.

**Ключевые слова:** АМг2, МКЭ, DICe, паттерн, спекл-интерферометрия, QForm, ParaView.

## Application of digital image correlation method for strain field assessment of a sheet workpiece

**M. A. Petrov<sup>1</sup>, V. V. Isakov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russia

**Abstract.** The paper considers the method of the digital image correlation (DIC) for practical application especially for technological test of formability according to Erichsen and uniaxial tension for aluminium and copper sheet workpieces, correspondingly. The peculiarity of test results' assessment is the application of a surface sketch or pattern without additional coating of the surface of the workpiece under study, as well as with an additional coating and a chaotic pattern created by paint, in combination with the parameters of the DICe program settings, in which the comparison of images is performed. It was found out that patterns with a frequent pattern are able to maintain the strain field discontinuity.

**Keywords:** AA5051, FEM, DICe, pattern, speckle interferometry, QForm, ParaView.

### Введение

В современной практике бесконтактные технологии оценки различных параметров неуклонно вытесняют контактные методы. Этот процесс обусловлен тем, что бесконтактные методы хорошо укладываются в концепцию «умного» производства, становление которого взаимосвязано с процессом цифровой трансформации производства, в рамках четвёртой промышленной революции (Industry 4.0). Можно выделить группу бесконтактных методов, позволяющих оценить качество материала, обрабатываемого методами обработки давлением на последующих участках. Наиболее востребованной данная технология является в производстве оболочковых деталей сложной формы из листового металла. Взятый курс на снижение веса конструкции без потери жёсткости требует либо применения прочных металлов и сплавов с пониженнной плотностью, либо композиционных материалов, либо деталей с изменённой геометрией конструкции, полученных, например, при помощи топографической оптимизации.

В основе упомянутых бесконтактных методов лежат технологии машинного зрения. В этом смысле хорошо известна такая библиотека машинного зрения, как OpenCV, широко применяемая на практике. Реализацию бесконтактных методов можно встретить в системах 3D-сканирования (3D-scanning), теневой фотографии (shadow projection), корреляции цифровых изображений (КЦИ, Digital Image Correlation (DIC) и т. д. Сначала происходит сбор информации аппаратными средствами, а затем следует её обработка программными средствами с выводом интересующих результатов [1].

В методике корреляции цифровых изображений задача может выполняться как в двухмерном (моно), так и в трёхмерном (стерео) режимах. Не всегда очевидно, что может получиться на выходе, какой режим выбрать для того или иного испытания. Так, например, при отсутствии большой

пластической деформации можно стереорежим заменить на двухмерный в случае, если материал заготовки не разрушается. В основе метода лежит сопоставление полученных изображений друг с другом в разный период времени на основе сравнения особенностей рисунка на поверхности, который может являться результатом обработки поверхности, либо искусственно создан на ней. Аппаратной частью системы КЦИ являются камеры, как правило, с разрешением не менее Full HD ( $1920 \times 1080$ ) или HD ( $1280 \times 720$ ), ведущие непрерывную съёмку в процессе эксперимента. Программной частью в специализированном программном обеспечении (ПО) выполняется обработка полученных результатов либо во время съёмки (в режиме онлайн), либо после эксперимента (в режиме оффлайн). Программы делятся на свободные, или open source, (например, DICe, py2DIC, ADIC2D/3D, OpenCorr) и проприетарные (например, GOM Correlate/Zeiss Inspect, VIC-2D/3D, Istra4D). Исследуемый образец рекомендуют подготовить, уменьшить отражающую способность поверхности и нанести уникальный неповторяющийся паттерн, например хаотично распределённые точки разного размера. Как правило, подготовка поверхности выполняется в два этапа: сначала наносят антибликовое покрытие, а затем аэрозольным методом наносят точки. Также требуется создать контраст между цветом поверхности и цветом точек. Самой простой парой являются чёрно-белые шаблоны (белая поверхность и чёрные точки). При использовании технологии подмешивания цвета или создания низкоуровневого шума (dithering) в зависимости от восприимчивости камерой оттенков цветов при определённом освещении можно выбрать и другие цветовые сочетания паттерна и поверхности.

Методика КЦИ применяется:

- для получения значения деформации при проведении механических испытаний (ZwickRoell 2D DIC (videoXtens, laserXtens), VDA-3D, VIC-2D/3D);
- характеристики колебаний и оценки дефектов в условиях динамических испытаний (Dantec DIC, GOM Aramis, EikoTwin DIC).

Встречаются исследования, в которых КЦИ применяется для изучения биомеханики растений [2], изучения разрушения образцов почвы [3] и других областей науки и техники [4]. С определёнными сложностями сталкиваются исследователи при выполнении механических испытаний в условиях повышенных температур [5, 6]. Развитие данной методики ведётся зарубежными сообществами, например Международным сообществом по КЦИ [7], целью которого является стандартизация методики, повышение точности и достоверности результатов, которые достигаются совместной работой специалистов в этой области, в том числе и через организацию бенчмарков и соревнований [8, 9]. Сообществом германских инженеров в 2019 году разработан стандарт VDI 2626, в котором закреплены основные определения, методики проведения КЦИ и оценка точности результатов.

**Целью исследования** является оценка работоспособности программы с открытым кодом для разных испытаний и типов подготовки поверхности заготовки. К **задачам** исследования относятся: 1) получение неразрывных полей для образцов до их разрушения для случаев одноосного нагружения и выдавливания полусферическим пуансоном; 2) выполнение валидации или сопоставления результатов численного моделирования и расчёта деформаций методом КЦИ для образцов со спектральной структурой (тип III); 3) определение степени влияния различных настроек в программе DICe на результат расчёта поля деформации.

### Экспериментальная часть

В обработке материалов давлением (ОМД) листовых материалов выполняются тесты на проверку технологических и механических свойств деформируемого материала. Это необходимо для того, чтобы определить технологические параметры, при которых разрушения материала наблюдаться не будет, а также будут гарантированы эксплуатационные свойства изготавливаемой детали. Тест на одноосное растяжение выполнялся на образцах, размеры которых соответствовали ГОСТ 1497-84, из тонколистового проката (фольги) меди марки М1 толщиной  $s = 100$  мкм (ГОСТ 859-2001), без специальной подготовки поверхности, на испытательной машине Мелитэк МЭС-Л-0.5. Тест по Эриксену (ГОСТ 10510-80 и ISO 20482) выполнялся на установке МТЛ 10Г-1 для заготовок из стали 10 толщиной  $s = 0,8$  мм; для поверхности образца без антибликового покрытия и с отсутствующим паттерном (тип I) и из алюминиевого сплава марки АМг2 толщиной  $s = 1,2$  мм; для поверхности без

антибликового покрытия с нанесенным паттерном (тип II); для поверхности с антибликовым покрытием и паттерном в виде спекл-структурой (тип III).

На рисунке 1 представлены изучаемые образцы из АМг2, разделённые по типам. Паттерны для заготовок типа II наносились по методу лазерной гравировки на установке, оборудованной лазерным модулем Raylase 1504 (Nd:YAG,  $\lambda=1064$  нм,  $W=20$  Вт/см $^2$ ). Маркировка выполнялась за один проход, применялись образцы-карточки размером 40×40 мм (типоразмер 1) и 85×95 мм (типоразмер 2). Время маркировки для образцов типоразмера 1 составило 45 секунд, а для типоразмера 2 – максимально 700 секунд, в зависимости от плотности заполнения паттерна.

Всего рассматривалось 10 паттернов с разной конфигурацией повторяющихся элементов, а также процентом заполнения площади деформируемой поверхности. Выбор типа паттерна осуществлялся исходя из следующих соображений: невысокая плотность покрытия поверхности паттерном затруднит процедуру анализа по методу КЦИ из-за большого удаления соседних элементов, а слишком высокая, наоборот, даст избыточную информацию, которая также приведёт к неправильным результатам. Экспериментально установлено, что разрушение образца наступает при перемещении пуансона на 11 мм, силе деформирования 0,0059 МН и максимальном утонении в месте разрушения материала  $\delta = 0,4$  мм. Эти исходные данные являются опорными.

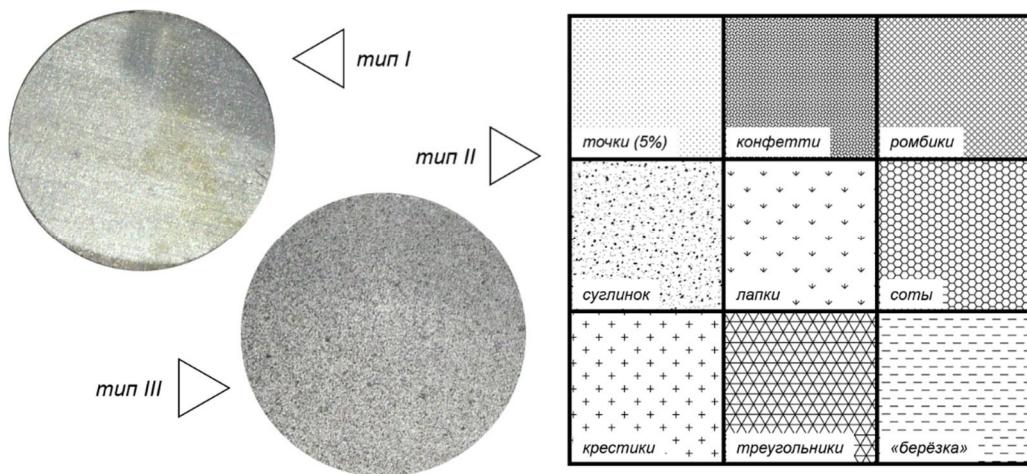


Рисунок 1. Изучаемые паттерны поверхности листовой заготовки

### КЦИ и численное моделирование

В качестве программного средства для выполнения КЦИ была выбрана программа с открытым кодом DICe (Digital Image Correlation Engine), разработанная в Sandia Laboratory (США) и, согласно данным GitHub, в январе 2016 года впервые представлена на платформе репозитория [10]. Программа DICe имеет интуитивный интерфейс для загрузки данных, но в силу наличия специальных функций требует дополнительных пояснений. Наиболее важными параметрами из представленных в интерфейсе программы являются *initialization method*, *sssig threshold* (пороговая граница контрастности), *subset size* (размер рабочей подобласти), *gauge size* (размер датчика) и *Gauss filter* (фильтр Гаусса). SSIG измеряет контрастность в каждой подгруппе и не позволяет DICe выделить подгруппу с низким значением SSIG, то есть данный параметр отфильтровывает области изображения с низким градиентом контрастности. Если у подгруппы значение SSIG ниже указанного значения, то она исключается. Для случая, когда имеются бликующие или затемнённые поверхности, значение этого параметра выставляют равным нулю. *Subset size* выполняет проверку того, попадает ли точка на границу конформного определения и не находится ли она в исключённой области, то есть размер данной области определяет выборку, по которой будет вестись сверка в процессе поиска решения. *Gauss filter* – низнечастотный фильтр, целью которого является изменение значений уровня серого в пикселях. Чаще всего с целью сглаживания перехода применяется Гауссова весовая функция (квадратичная, либо линейная). Контроль точности решения выполняется по четырём параметрам и визуальной оценке пользователя. Переменная *SIGMA* показывает прогнозируемую вариацию

смещения, оценивает прогнозируемую вариацию решения по смещению с учётом вариаций данных, вызванных шумом и смещением интерполяции. Переменная GAMMA отражает качество соответствия шаблону; измеряет, насколько хорошо шаблон или подмножество эталонного изображения соответствует деформированному изображению; является критерием корреляции (или модуля целевого функционала). Переменная BETTA является функцией потерь и измеряет чувствительность функции потери к малым возмущениям в решении по смещению. Четвёртый параметр – экземпляр пост-процессора UNCERTAINTY, который вычисляет неопределенность в оценке смещения в ходе выполнения КЦИ.

Валидируемым выходным полем является поле напряжений виртуального датчика (Virtual Strain Gauge (VSG\_Strain) для двух главных направлений (XX, YY) и в плоскости (XY), при этом деформация для третьего направления ZZ вычисляется в программе ParaView (рис. 2).

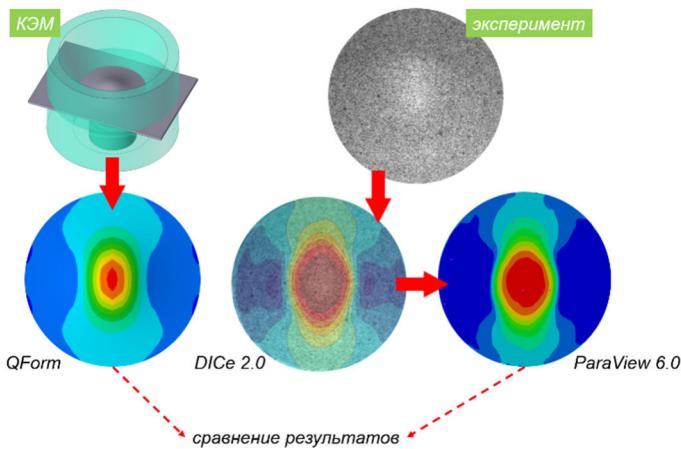


Рисунок 2. Схема выполнения валидации результатов

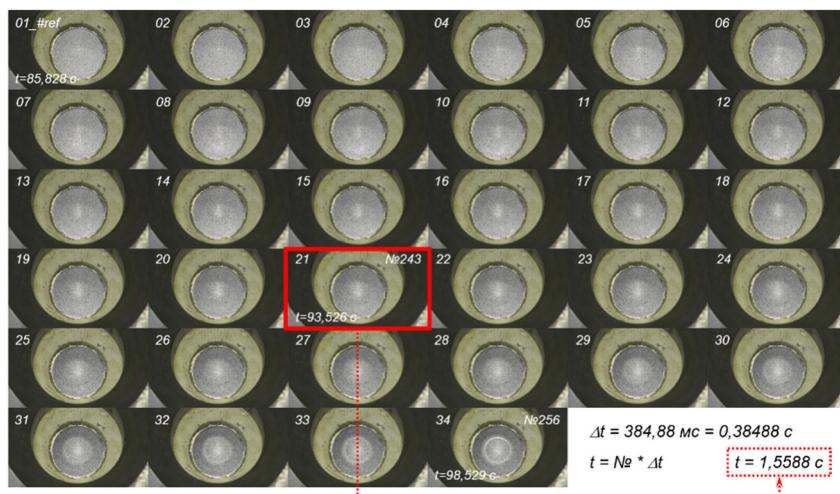


Рисунок 3. Схема выполнения валидации результатов

Численная оценка значений деформаций в программе DICe является непростой задачей, несмотря на наличие легенды, так как простановка меток со значениями деформаций имеющимися в программе инструментами невозможна. Оценку величины деформации можно выполнить визуально, а также путём сравнения цветов по полю с цветами на шкале легенды, например, по цветовой схеме RGB при помощи инструмента «пипетка» в любом редакторе изображений. Более продвинутым способом является экспорт результатов расчётов, представляемых в формате Exodus (\*.e), и их импорт в программу ParaView, разработанную также на принципе открытого кода. Численное моделирование теста по Эриксену по методу конечных элементов было выполнено в программе QForm и более подробно рассматривается в работе [11]. Для одноосного растяжения сравнительное численное

моделирование не выполнялось. Анализировались только результаты КЦИ. Для сопряжения решений численной задачи и результата КЦИ определялось время расчёта и вычислялось время по порядковому номеру кадра раскадровки, выполненной в программе VLC в стандартных фильтрах сцены, с периодичностью каждый седьмой и пятнадцатый кадры (рис. 3).

### Обсуждение результатов

На рисунке 4 представлены виды разрушений образцов. Несмотря на то что изготовление образцов выполнялось из одного листа, геометрия трещины указывает на то, что паттерн выступил в случае, например, ромбиков, шестигранников, конфетти и треугольников в роли концентраторов напряжений, по которым развивалась трещина.

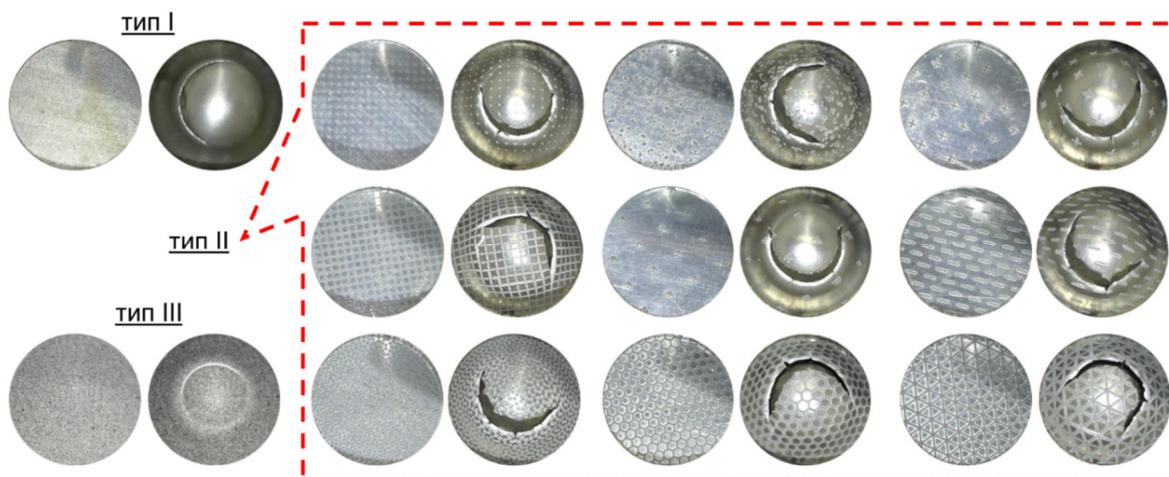


Рисунок 4. Вид образцов до (слева) и после (справа) разрушения, тест по Эриксену

На рисунке 5 показано сравнение значений напряжений для случаев численного моделирования и КЦИ образца третьего типа. Расхождение значений получено во втором и третьем знаках после запятой, что указывает на достаточно высокое совпадение результатов. На рисунке 6 показаны результаты одноосного растяжения. Отметим, что наилучший результат был получен для случая максимизации значений gauge size и gauss filter image window, уменьшения шага между контрольными точками с 14 до 9 пикселей, а также с минимизацией значения sssig. Это позволило получить поле, показывающее уровень критического значения напряжения, при котором наблюдается разрушение материала образца из меди. Размер области subset size менялся в ходе реализации КЦИ, но не сильно оказывал влияние на результат.

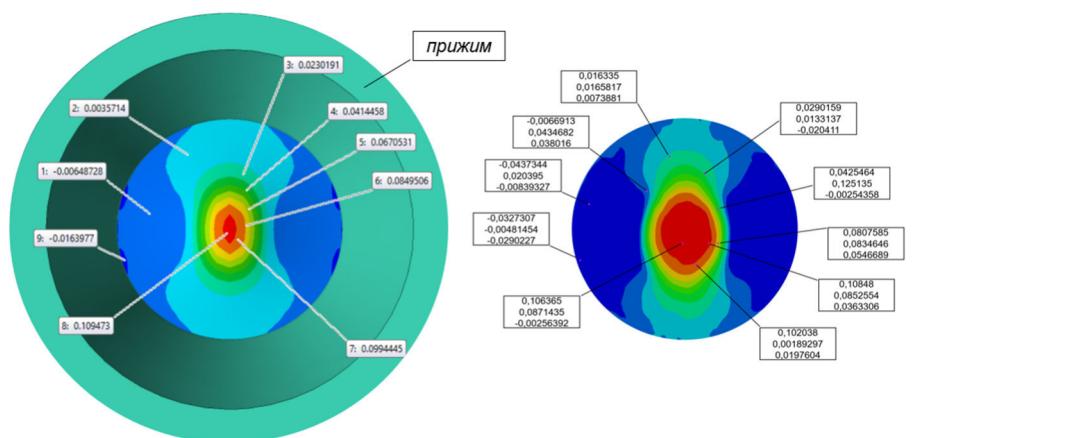


Рисунок 4. Сравнение значений деформаций: QForm, деформация\_XX (слева) и ParaView, деформации\_XX, \_YY и \_ZZ (справа, надписи сверху-вниз в выноске)

На рисунке 7 представлены наиболее удачные результаты теста по Эриксену для образов второго типа. Для сравнения приводится результат, полученный на спекл-структуре. Стоит отметить, что наличие бликующей поверхности образцов второго типа не всегда является проблемой. Так, паттерн в виде точек, конфетти, шестигранников и суглинка хорошо зарекомендовал себя на первых этапах расчётов (до пятого-шестого шага). Однако в дальнейшем ввиду бликов и перераспределения отражённого света от паттерна поле значений разваливается. Добавление промежуточных фотографий не улучшает восприятие картинки программой.

Сравнивая характеристику поля деформаций по главному направлению XX, отметим, что в случае спекл-структуры поле деформации лучше описывает физический эксперимент и тот результат, который наблюдался в численном моделировании. И наоборот, на втором шаге расчёта у образцов второго типа с точечным паттерном наблюдаются некоторая хаотичность и асимметрия в полях после его образования и развития.

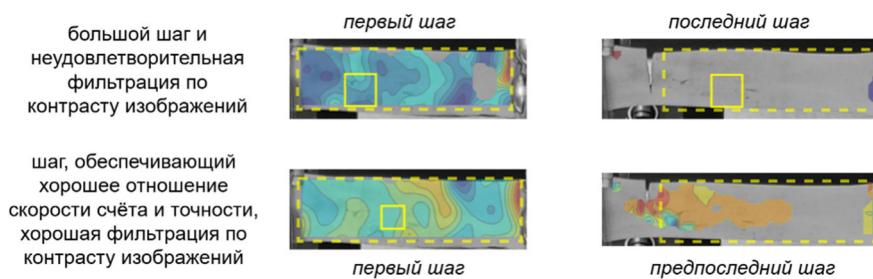


Рисунок 6. Результаты одноосного растяжения по КЦИ

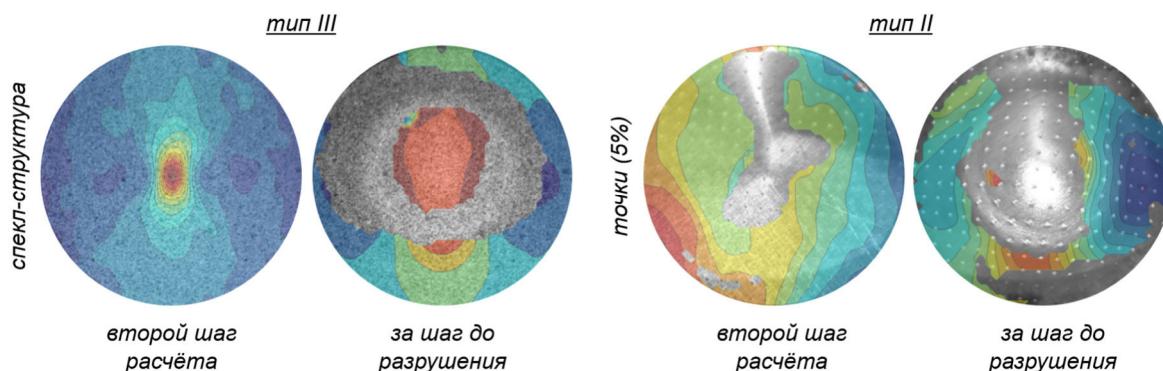


Рисунок 7. Результаты теста по Эриксену после анализа по методу КЦИ

## Выводы

В результате выполненных исследований установлено следующее: 1) получить неразрывные поля для образцов второго типа на растяжение и выдавливание полусферическим пуансоном возможно лишь на первых 5...6 шагах расчётов, так как в дальнейшем блики мешают построению поля значений; 2) выполненная валидация численного моделирования и КЦИ для образца со спекл-структурой является хорошей, так как несоответствие значений выявлено во второй-третьем знаке после запятой; 3) такие настройки, как фильтрация данных и размер датчика деформации, в сильной степени влияют на результат расчёта.

Вычисление напряжения в третьем направлении осуществляется в программе ParaView, что позволяет говорить об оценке третьей координаты в режиме двухмерного КЦИ-анализа. Поля показывают разрывность по мере приближения момента образования трещины. В связи с этим появляется возможность выполнить гибридный вариант КЦИ: в монорежиме до разрушения получить поле интересующих значений, а при подходе к моменту разрушения материала перейти в стереорежим, что позволит при работе в онлайн-режиме сократить время на обработку меньшего количества получаемой информации без потери качества оценки величин.

### Заключение

Рассмотренный метод бесконтактной оценки деформации КЦИ является весьма перспективным для области ОМД, для оценки деформации материалов при комнатных температурах. При повышенных температурах данная методика интересна лишь для условий неинтенсивного конвективного теплообмена и отсутствия свечения объекта исследования. Открытые библиотеки машинного зрения, например OpenCV, позволяют самостоятельно разработать приложение для реализации рассмотренных выше задач. Однако в Российской Федерации нет открытых программ, подобно DICe или OpenCort, для применения и апробации техники КЦИ, которая весьма полезна для развития как национальной базовой и фундаментальной науки, так и в инженерной практике. Интерес и перспективы развития метода постепенно способствуют вовлечению ИТ-специалистов и, несомненно, приведут к появлению доступных программ и оборудования для КЦИ, разработанных в России.

### Список литературы

1. Осинцев А.В., Очков К.Ю. Визуализация перемещений и деформаций методом цифровой корреляции изображений // Научная визуализация. 2016. № 8:2. С. 15–23.
2. Mylo M.D., Poppinga S. Digital image correlation techniques for motion analysis and biomechanical characterization of plants. *Front. Plant Sci.* 14:1335445 (2024). DOI: 10.3389/fpls.2023.1335445
3. Arza-García M., Núñez-Temes C., Lorenzana J.A., et al. Evaluation of a low-cost approach to 2-D digital image correlation vs. a commercial stereo-DIC system in Brazilian testing of soil specimens. *Archiv.Civ.Mech.Eng* 22, 4 (2022). DOI: 10.1007/s43452-021-00325-0
4. Périé J.-N., Passieux J.-C. Advances in Digital Image Correlation (DIC). *Applied Sciences* (2020). DOI: 10.3390/books978-3-03928-515-0
5. Lyons J.S., Liu J., Sutton M.A. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation. *Experimental Mechanics* 36, 64–70 (1996). DOI: 10.1007/BF02328699
6. Kempny M. Digital image correlation - method development, scope, principle of functioning, and future goals. *Journal of Metallic Materials*, 3–4. 30–41. (2022). DOI: 10.32730/imz.2657-747.22.3-4.4
7. International Digital Image Correlation Society. Jones E.M.C. and Iadicola M.A. (Eds.). A Good Practices Guide for Digital Image Correlation (2018). DOI: 10.32720/idics/gpg.ed1/print.format
8. Reu P.L., Toussaint E., Jones E., et al. DIC Challenge: Developing Images and Guidelines for Evaluating Accuracy and Resolution of 2D Analyses. *Exp Mech* 58, 1067–1099 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0349-0>
9. Reu P.L., Blaysat B., Andó E., et al. DIC Challenge 2.0: Developing Images and Guidelines for Evaluating Accuracy and Resolution of 2D Analyses. *Exp Mech* 62, 639–654 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11340-021-00806-6>
10. Репозиторий GitHub “Digital Image Correlation Engine (DICe)”. URL: <https://github.com/dicengine> (дата обращения: 29.08.2025).
11. Петров М.А. , Ромашов Д.А. , Исаков В.В. Применение бесконтактных способов оценки деформации при испытаниях на выдавливание алюминиевой листовой заготовки по Эриксену // ГрафиКон 2023: труды 33-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению (Москва, 19–21 сент. 2023 г.). М.: Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2023. С. 274–284.