

Определение деформаций цилиндрических образцов оптическим способом с использованием метода цифровой корреляции изображений

© 2022

Расторгуев Дмитрий Александрович^{*1}, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
*Семенов Кирилл Олегович*², аспирант кафедры «Оборудование и технологии
машиностроительного производства»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

*E-mail: rast_73@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6298-1068>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0397-4009>

Поступила в редакцию 09.02.2022

Принята к публикации 06.05.2022

Аннотация: Обеспечение допусков расположения и их сохранение в послеоперационный период является одной из основных и труднодостижимых технологических задач при изготовлении длинномерных маложестких деталей типа вал. Одним из технологических методов, направленных на обеспечение данной группы геометрических показателей, включая прямолинейность оси, является комбинированная обработка – правка растяжением или термосиловая обработка. Повышение эффективности данной технологии невозможно без знания особенностей формирования распределения пластических деформаций по длине длинномерных заготовок. В статье рассмотрено применение оптического способа контроля деформации по поверхности с использованием метода корреляции цифровых изображений при осевом деформировании цилиндрических образцов. Приведено описание экспериментальной установки для оптического контроля деформаций при нагружении образца с использованием цифровых камер. Исследовано влияние различных режимов нанесения краски на образец (скорость нанесения, расстояние, характер нанесения – непрерывный или импульсный) на особенности полученного спекла в виде случайного распределения пятен краски различного размера по поверхности образца. Получены гистограммы распределения яркости различных спеклов. Проведены эксперименты по определению деформаций на основе метода локального градиентного способа корреляции цифровых изображений для образцов из полимерных трубок с различным характером спекла. Определены распределения деформаций по длине для образцов по выбранной для анализа деформируемой области с заданной степенью сглаживания, обеспечиваемой выбором размера окна корреляции и выбором шага его смещения для фиксации деформационных процессов с определенной погрешностью. Получены распределения осевых деформаций по длине образцов и ошибки определения деформаций в зависимости от вида спекла. Определены необходимые параметры спекла, обеспечивающие минимальную погрешность для длинномерных образцов до 200 мм длиной, и соответствующая технология нанесения краски. Это спекл с широким диапазоном размеров пятен, разреженным их расположением и сглаживанием изображения фильтром Гаусса перед началом анализа.

Ключевые слова: цифровое изображение; цифровая корреляция изображений; корреляционный анализ; спекл; продольная деформация; оптический контроль.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90148.

Для цитирования: Расторгуев Д.А., Семенов К.О. Определение деформаций цилиндрических образцов оптическим способом с использованием метода цифровой корреляции изображений // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 2. С. 74–83. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-74-83.

ВВЕДЕНИЕ

В сравнении с традиционными методами измерений деформаций (спекл-, голографическая или муаровая интерферометрия, тензометрия, краткий обзор которых приводится в [1]) резко увеличилось число работ, связанных с использованием бесконтактного оптического метода определения деформаций – метода цифровой корреляции изображений (ЦКИ), наиболее полное и систематическое изложение которого дано в [2]. Это связано с тем, что данный метод контроля можно использовать в производственных, а не только в лабораторных условиях, он менее требователен к метрологическому обеспечению, более простой в настройке и в использовании, относительно недорогой и при этом обеспечива-

ет необходимую точность измерения деформаций. Для выполнения измерений с использованием данного метода можно задействовать бюджетные аппаратные средства. В работе [3] приведен пример применения относительно недорогих аппаратных средств и некоммерческого программного обеспечения для анализа смещений и деформаций, а также рассмотрен пример применения бесконтактного анализа химических реакций при фотоизомеризации. Для анализа деформаций могут использоваться некоммерческие программы Ncorr [4], DICe [5], py2DIC [6].

Области применения оптического бесконтактного измерения деформации на основе метода ЦКИ – исследования деформации материалов для определения их характеристик и прочностных свойств [7], исследования

зарождения и распространения трещин, исследования повреждений в композитных материалах, определение деформации элементов конструкций [8], в том числе вибрационные, исследования высокотемпературных деформаций [9].

Использование метода ЦКИ для определения распределения деформаций обусловлено тем, что для исследования процессов деформирования с целью отработки технологии термосилового обработки, которая заключается в совместном температурном и силовом воздействии на заготовку, необходимы данные по пространственному распределению деформаций вдоль продольной оси заготовки, имеющей, как правило, значительную длину (более 200 мм), грубую неподготовленную поверхность и цилиндрическую форму. В большинстве научных исследований, проведенных с применением метода ЦКИ, анализу подвергается небольшая область плоских, специально подготовленных образцов. Таким примером могут служить результаты исследования по локализации деформаций для металлических образцов [7]. Применявшийся ранее дискретный метод оценки распределения пластических деформаций не удовлетворяет современным требованиям к точности [10].

В основе метода ЦКИ лежит сравнение пар цифровых изображений исходного и деформированного образца с вычислением полей векторов смещений отдельных областей, определяемых окном корреляции, с последующим расчетом компонент деформаций. Точность определения деформаций методом ЦКИ зависит от аппаратного, программного и алгоритмического обеспечения.

Основой алгоритма ЦКИ является вычисление взаимной корреляционной функции или определение разности задаваемого окна корреляции исходного изображения при его перемещении по полю изображения деформированного образца [11]. В первом случае находят максимум, во втором случае – минимум. Новое определенное положение окна корреляции показывает его смещение из начального положения $x(x_i, y_i)$ в новое $w(x, z)$ [12]. Если происходит смещение или движение всего окна, то используется функция формы нулевого порядка:

$$z_1(x_i, y_i) = u;$$

$$z_2(x_i, y_i) = v,$$

где x_i, y_i – координата точки на изображении; u и v – смещение по осям x и y .

Нормированная с нулевым средним сумма квадратов разностей (zero-normalized summa of squared differences – ZNSSD):

$$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{[f(x_i, y_i) - f_m]}{\Delta f} - \frac{[g(x_i, y_i) - g_m]}{\Delta g} \right]^2,$$

где f_m, g_m – средняя интенсивность тона в пределах ядра корреляции деформированного и исходного изображений;

$\Delta f, \Delta g$ – среднеквадратичное отклонение интенсивности тона;

M – размер ядра корреляции.

Для определения параметров смещения ищется вектор $w(x, z)$ через итерационное решение задачи оптимизации при минимизации параметра:

$$C_{ZNSSD, opt} = \arg \min \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{[f(w(x, z)) - f_m]}{\Delta f} - \frac{[g(x) - g_m]}{\Delta g} \right]^2.$$

Вычисление корреляционных функций, или в терминах оптимизационной задачи – минимизация разницы параметров этого окна в исходном изображении и изображении деформированного образца, дает значение вектора $w(x, z)$, которое показывает текущее смещение рассматриваемого окна по координатам, что дает нам компоненты горизонтального и вертикального смещения. Вычисление параметров вектора $w(x, z)$ при минимизации нормированной с нулевым средним суммы квадратов разностей в простейшем случае дает вектор $z = f(u, v)$, который формирует с заданным шагом поле перемещений в виде векторов определенной длины и направления. В случае функции формы z более высокого порядка получаем также поле сдвиговых смещений и поворотов. После этого, как в нашем случае, полученные значения смещений u и v интерполируются при помощи бикубического полинома, получая непрерывное поле смещений. Затем производят численное дифференцирование этого поля смещений, получая значения деформаций. Для осевой деформации эта формула выглядит следующим образом:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial v}{\partial x} + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right).$$

Для этого изображение поверхности деформируемого образца должно соответствовать определенным требованиям [13]. Оно должно иметь покрытие рисунком, так называемым спеклом, в виде уникального распределения случайно расположенных пятен. При этом изображение должно иметь определенный уровень контраста и интенсивности освещения. Каких-либо особых требований к освещению объекта, как правило, не предъявляется, кроме равномерности освещения. В отдельных случаях поверхности с таким спеклом могут быть получены естественным путем. В работе [14] приведен обзор методов нанесения спекла и влияние его характеристик на точность измерения деформаций при ЦКИ.

При выборе способа нанесения спекла необходимо остановиться на наиболее подходящей из существующих технологий. Это могут быть разбрызгивание с использованием пульверизаторов, нанесение вручную, через трафарет, термопечать, лазерное нанесение спекла, обработка поверхности электронными пучками, литография, травление или царапанье поверхности. В работе [9] приведен пример применения маркера для нанесения спекла в виде точек с использованием оборудования с числовым программным управлением. Показана возможность комплексного анализа термодинамических процессов. Рассмотрен случай использования

термограммы для оценки методом граничных элементов тепловых деформаций совместно с деформациями от силового нагружения, полученного методом ЦКИ. Параметры и характер спекла должны соответствовать необходимому пространственному разрешению при определении деформации.

Покрытие состоит из двух слоев: фона и рисунка. При распылении краски, которая должна иметь определенные вязкостные свойства, характер картинки спекла будет зависеть от диаметра сопла pulverизатора, направления распыления, расстояния до образца, скорости нанесения и времени нанесения покрытия. Спекл должен иметь определенные качественные и количественные характеристики, которые характеризуют степень его приспособленности для точного определения смещений и деформаций. К качественным характеристикам относят отчетливость, стабильность фоновых характеристик, уникальность, связанную с отсутствием периодичности расположения пятен в рисунке и их случайным расположением. Количественные оценки могут проводиться с использованием гистограмм освещенности анализируемой области. Возможна оценка плотности пространственного распределения пятен спекла по их величине и равномерности. С одной стороны, есть требование к градиенту элементов изображения. Контрастность должна соответствовать высокому уровню градиента интенсивности, то есть на изображении границы пятен должны быть резкими, и их расположение должно иметь случайный непериодический характер. Но это приводит к зашумлению данных при вычислении смещений из-за операции дифференцирования. Требование к спеклу, что он должен быть изотропный – ненаправленный, то есть форма пятен и расстояния между ними в разных направлениях должны быть примерно одинаковыми, неоднозначно. Синтезированный рисунок спекла, нанесенный через трафарет и имеющий ячеистую пиксельную структуру, показал минимальную погрешность при его использовании [15].

Для обеспечения различимости пятен спекла необходимо, чтобы их размер составлял порядка 3–5 пикселей. Само покрытие должно иметь высокую адгезию к поверхности образца и не должно отслаиваться и трескаться при деформировании.

Цель работы – установление распределения деформаций по длине длинномерного цилиндрического образца при его осевом нагружении с использованием метода ЦКИ.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения заявленной цели были систематизированы виды спеклов по их характеристикам и определено влияние спекла, нанесенного на образец, на точность определения деформаций и их распределение при осевом нагружении цилиндрических образцов.

Для анализа использовался образец – трубка из полимерногo материала длиной 200 мм.

Вначале была выполнена подготовка образцов с нанесением фона из белой матовой краски, а затем – с нанесением пятен спекла с использованием разбрызгивания из pulverизатора с различными параметрами нанесения. Расстояние изменялось в пределах от 0,3

до 0,5 м. Время нанесения – 1 и 2 с. Характер нанесения – непрерывный или импульсный. Использовались шесть образцов. Параметры нанесения спекла для образца 1: 0,5 м, 2 с, непрерывно. Образец 2: 0,3 м, 1 с, импульсно. Образцы 3 и 4: 0,5 м, 1 с, непрерывно. Образец 5: нанесение спекла через трафарет. Образец 6: 0,3 м, 2 с, импульсно. Для данных образцов с различным характером нанесенного рисунка построены гистограммы их изображений спекла.

После этого была выполнена настройка системы съемки с установкой цифровых камер на расстоянии до объекта съемки, обеспечивающем максимальную резкость изображения (рис. 1). Данное расстояние определялось заранее с использованием настроечных таблиц мир [16]. Фокусное расстояние оценивалось предельным положением объекта съемки с точки зрения обеспечения резкости изображения полученного поля распределения деформаций. Использовалась камера Basler acA1440-73gm с интерфейсом GigE, CMOS-матрицей IMX273 от Sony при разрешении 1,6 Мпикс. Обработка изображений выполнялась с одной камеры. Вторая контролировала смещение плоскости съемки. Данную схему установки можно применять для стереосъемки. Калибровка камер выполнялась с использованием калибровочной таблицы в виде шахматной доски с известными размерами полей. Проводилась установка параметров съемки в виде определенной периодичности по времени – дискретности получения кадров, задание выдержки. Далее следовала установка и закрепление деформируемого образца на силовой установке с последующим растяжением образца до заданной величины с одной и той же скоростью с одновременным получением серии изображений. В данном случае рассматривается деформация вдоль всей длины образца в 200 мм. С учетом полученных калибровочных коэффициентов проводилась корректировка радиальной дисторсии изображений. После этого скорректированные изображения подвергались фильтрации с целью снижения шума на изображении и повышения резкости и контрастности.

Для исключения влияния паразитных смещений всей установки на изображении растянутого образца контролировалось смещение базовой неподвижной области. В нашем случае это сечение, где происходит закрепление образца на фиксирующем стержне. В данной области предполагается нулевое смещение, и, соответственно, если здесь происходило смещение, необходимо было вводить поправку на паразитные смещения всей нагружающей системы [17].

Дополнительно было выполнено наложение изображений исходного и деформированного образцов с измерением смещений контрольных точек в сечении с установленными реперными стержнями толщиной 0,5 мм с точностью до 0,5 пикселей (0,025 мм). Дополнительно контролировалось смещение нижнего фиксатора с индикатором, имеющего погрешность 0,01 мм.

Алгоритм определения параметров смещений и деформаций состоял из следующих этапов [18]. Набор изображений загружался в программу DICe, реализующую градиентный метод ЦКИ. В полученной серии выбиралось начальное изображение недеформированного образца. Остальные последовательно принимались как изображения деформированного образца для сравнения с исходным. В программе DICe при расчете

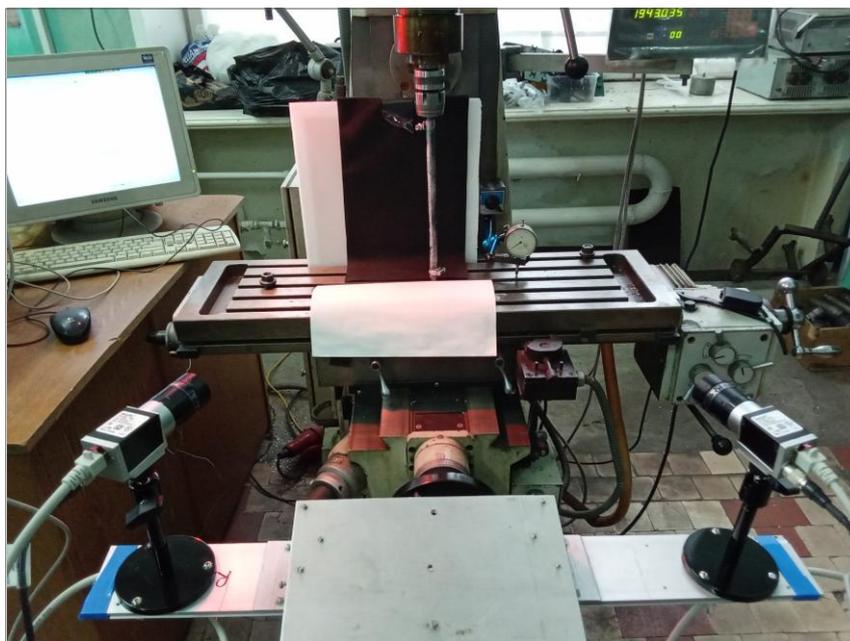


Рис. 1. Экспериментальная установка для измерения деформаций методом ЦКИ
Fig. 1. Experimental unit for measuring deformations using the digital image correlation method

смещений и деформаций варьировались следующие параметры: размер окна корреляции, шаг его смещений, использование и параметры ядра фильтра Гаусса, необходимого для сглаживания элементов изображения, что снижает ошибку интерполяции данных расчета [19]. Для выполнения расчета выбирались параметры алгоритма: размеры корреляционного окна, шаг его смещения, порог чувствительности, размеры сглаживающего фильтра, обеспечивающие минимальную ошибку определения деформации. Расчет проводился при следующих параметрах: размер окна корреляции – 31 пиксель; шаг смещения – 8 пикселей; анализ как без фильтрации, так и с фильтрацией сглаживающим фильтром Гаусса с размером ядра 5 пикселей.

Алгоритм расчета должен иметь нечувствительность к шуму изображения и недостатку контраста. Необходимо обеспечить сбалансированность между сглаживанием, которое усредняет значения деформаций, и высоким пространственным разрешением (в данном случае рассматривается как мельчайшая различимая деталь на изображении и определяется в пикселях на мм), которое приводит к появлению шума и случайной ошибке из-за невозможности различать сравниваемые участки из-за малой уникальной информации в ядре корреляции.

Спекл со значительным перепадом освещенности фона имел значительный фоновый градиент, и затемненные области исключались из расчета, так же как и бликовые, возникающие от засветки.

Результаты расчета визуализировались путем построения полей смещений и деформаций в программе ParaView. Для этого массив данных по результатам расчета в программе DICe, куда входят координаты расчетных точек, их смещения и деформации по осям, загружались в программу ParaView. Из-за цветовой градации расчетных параметров отображение их в по-

лутоновом формате не информативно, поэтому в статье показаны значения продольной деформации вдоль центральной оси образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 приведены спеклы различного вида. Они получены при использовании техники разбрызгивания из пульверизатора с разной длительностью и скоростью нанесения. Образец 5 имеет спекл, нанесенный через трафарет.

Оценка размера нанесенных элементов различных видов спекла показала, что их значение для наиболее мелких пятен равно 0,04–0,15 мм (0,8–3 пикселя). Крупные пятна достигали размера 0,5 мм (10 пикселей). Деформация образца длиной порядка 200 мм обеспечивалась до 10 %. Это составляет возможное общее удлинение в 20 мм, при этом используемые камеры дают разрешение по высоте 1080 пикселей, что составляет 5 пикселей на 1 мм. Для образца это точность порядка 0,01 %.

Для различных видов спекла, показанных на рис. 2, соответствующие гистограммы распределения яркостей пикселей приведены на рис. 3.

Погрешность расчета деформаций показана на рис. 4, где шаг расчета, соответствующий номеру снимка, откладывается по оси x , а по y – ошибка определения деформации на каждом этапе расчета. Нумерация графиков соответствует номерам образцов с соответствующими спеклами (рис. 2).

Полученные при расчете значения продольной деформации по координате y вдоль оси образца представлены на рис. 5. При использовании различного спекла, а также параметров алгоритма ЦКИ получают различные результаты в оценке смещений и деформаций (рис. 4 и 5).

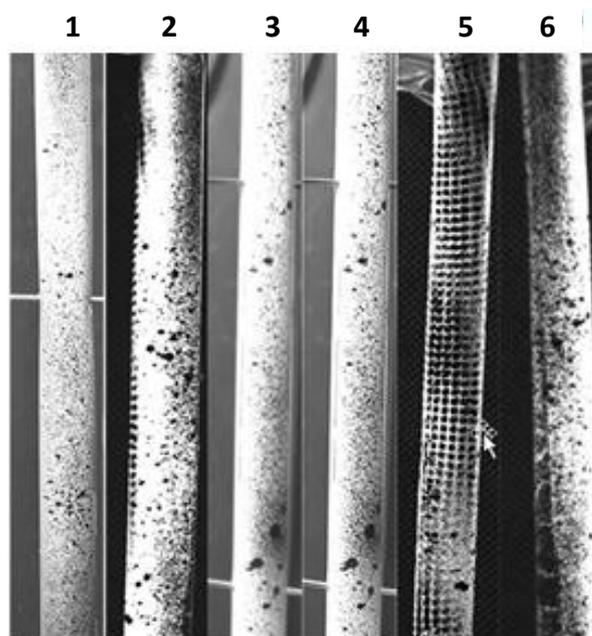


Рис. 2. Образцы со спеклом: с плотным заполнением (1), с разреженным с большой вариацией размеров пятен (2), со сглаженным разреженным (3), с контрастным разреженным (4), с метками в виде ячеек (5), с вариацией освещения фона с большим диапазоном размеров (6)

Fig. 2. Specimens with a speckle: with dense filling (1), with rarefied with great variation of spot sizes (2), with smoothed rarefied (3), with contrast rarefied (4), with cell-type marks (5), with background illumination variation with large range of sizes (6)

Для некоторых образцов (1–4) нагрузка проводилась до максимума с последующей разгрузкой, для некоторых (5–6) – только до максимума (рис. 2).

Для одной и той же деформации образцов, которая достигалась на разном шаге при съемке, результаты приведены на рис. 5. Это график распределения продольной деформации вдоль осевой линии образца.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Источниками ошибок при двухмерном методе ЦКИ являются сам образец со своим спеклом, геометрией, способ нагрузки и съемки. Источниками погрешностей могут быть характер рисунка спекла, не параллельность между плоскостью объекта и плоскостью съемки (компенсируется как наладкой нагружающей системы с контролем положения образца, так и коррекцией тангенциальной дисторсии), деформация вне первоначальной плоскости съемки (также необходима наладка и контроль нагружающей системы – в данном случае использование снимков второй камеры), искажения изображения, шум или помехи, возникающие во время съемки.

Ошибки могут происходить от алгоритма обработки изображения (нерациональный выбор размера окна [12], функции корреляции, алгоритма интерполяции [19], функции формы). Выход объекта из плоскости съемки ведет к изменению расстояния до объекта, что приводит к ошибкам из-за изменения увеличения изображения при меняющемся расположении камеры относительно объекта. В данном случае отдельное изме-

рение образца, с приближением его нижнего конца к камере, создает дополнительную составляющую осевой деформации 0,0015 %, что на порядок меньше значений, фиксируемых при осевом растяжении. Точность определения деформаций длиномерных образцов, в отличие от результатов исследования компонент деформации ограниченного объема при растяжении полимерных образцов, приведенных в [20], в данном случае определяется разрешающей способностью цифровой камеры и параметрами спекла.

Размеры частиц спекла, их распределение, диапазон их изменения влияют на ошибку измерения деформаций. Наиболее равномерное распределение спекла приводит к минимальной погрешности измерений. Для оценки спекла необходимо использовать комплексные показатели, как, например, в [15].

Для образцов с регулярным рисунком (рис. 1, образец 5) получить расчетные деформации при исходных параметрах расчета не получилось. Только для увеличенного до 15 пикселей шага смещения корреляционного ядра расчет был выполнен. Уменьшение шага смещения окна до 3 пикселей с увеличением размеров ядра фильтра Гаусса до 9 пикселей приводит к значительному зашумлению результата расчета.

Ошибка расчета минимальная для группы образцов спекла 2, 3 и 6 (рис. 1). Образцы 2 и 6 имеют схожие картины спеклов, но у образца 6 наблюдается значительная фоновая градация по тону, а их гистограммы значительно отличаются. Из-за затененных областей у образца 6 на гистограмме наблюдается пик в области темных пикселей с постепенным снижением к области светлых тонов.

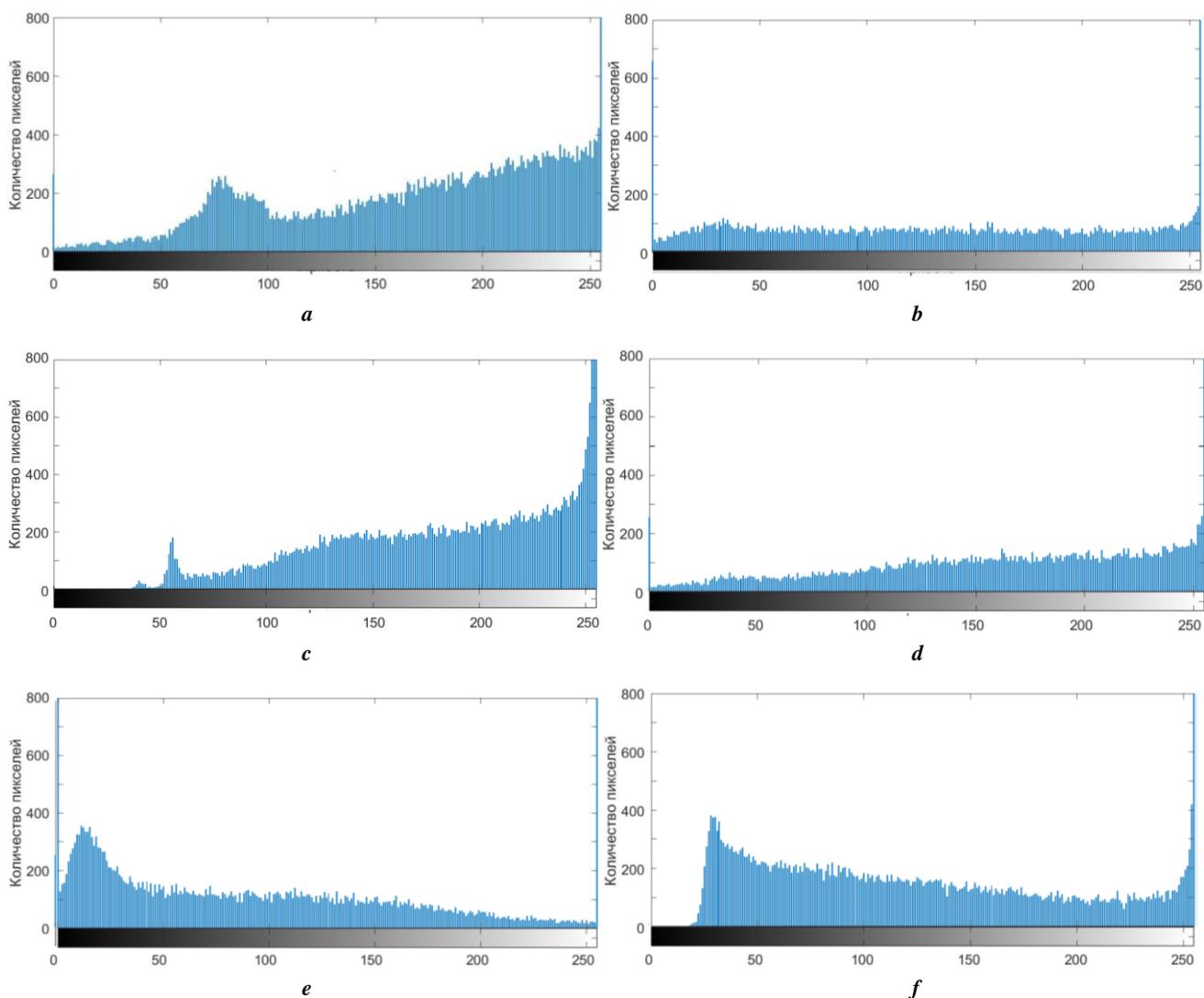


Рис. 3. Гистограммы спеклов: *a* – с плотным заполнением (образец 1 на рис. 2),
b – разреженным с большой вариацией размеров пятен (образец 2 на рис. 2),
c – сглаженным разреженным (образец 3 на рис. 2), *d* – контрастным разреженным (образец 4 на рис. 2),
e – с метками в виде ячеек (образец 5 на рис. 2),
f – с вариацией освещенности фона с большим диапазоном размеров (образец 6 на рис. 2)
Fig. 3. Speckles histograms: *a* – with dense filling (specimen 1 in fig. 2),
b – rarefied with great variation of spot sizes (specimen 2 in fig. 2), *c* – smoothed rarefied (specimen 3 in fig. 2),
d – contrast rarefied (specimen 4 in fig. 2), *e* – with cell-type marks (specimen 5 in fig. 2),
f – with background illumination variation with large range of sizes (specimen 6 in fig. 2)

У образца 3, который отличается от образца 4 сглаженным спектром, гистограмма имеет пик в темной области с постепенным возрастанием к светлым тонам. У образца 4, который имеет повышенный уровень контраста, гистограмма полностью сглажена. Распределение в явном унимодальном виде имеет только спекл, полученный через трафарет, у образца 5. Анализ гистограмм распределения яркостей пикселей показал неоднозначность их влияния на эффективность определения деформаций методом ЦКИ. Как видно из графиков на рис. 4 и 5, величина ошибки и характер распределения деформаций не определяется однозначно характером гистограммы.

Наиболее оптимальным спеклом по точности и сглаженности расчетных данных по деформации обладают образцы 2, 3 и 6. Спекл должен обеспечивать плотное

заполнение фона пятнами, имеющими значительную вариативность в размерах частиц.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Апробирована методика и система контроля деформаций оптическим способом для осевого нагружения цилиндрических образцов на примере использования трубок из полимерных материалов длиной до 200 мм. Для верификации определяемых оптическим методом деформаций в спроектированной установке дополнительно используются реперные точки и стержни, а также контроль индикаторным устройством. Подготовлена методика оценки оптическим способом деформаций с определением следующих параметров: осевых и поперечных смещений и деформаций, а также ошибки

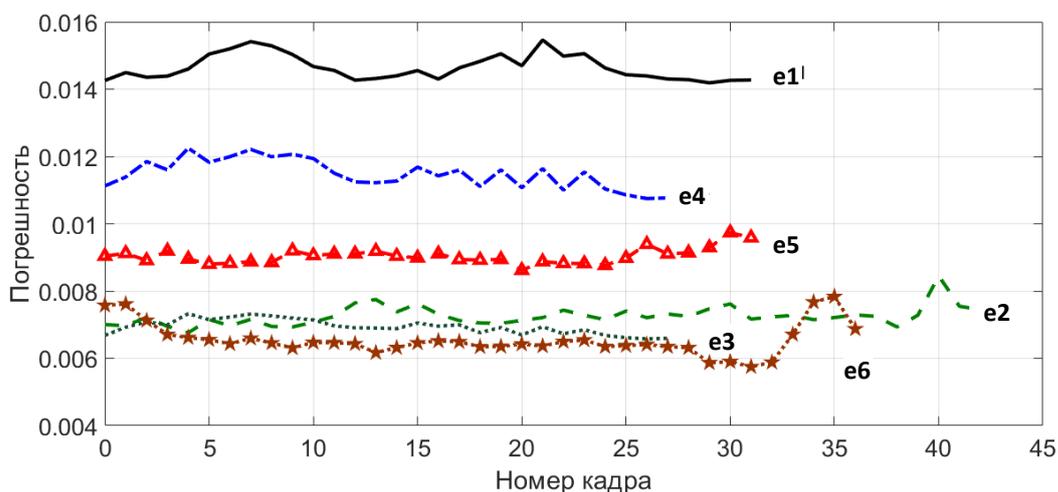


Рис. 4. Графики ошибки расчета деформации для контрольных точек при расчете деформаций образцов с различным спеклом и параметрами расчета (графики e1–e6 соответствуют образцам 1–6 на рис. 2)
Fig. 4. Diagrams of errors of deformation analysis for checkpoints when estimating deformations of specimens with various speckles and calculation parameters (diagrams e1–e6 correspond to specimens 1–6 in fig. 2)

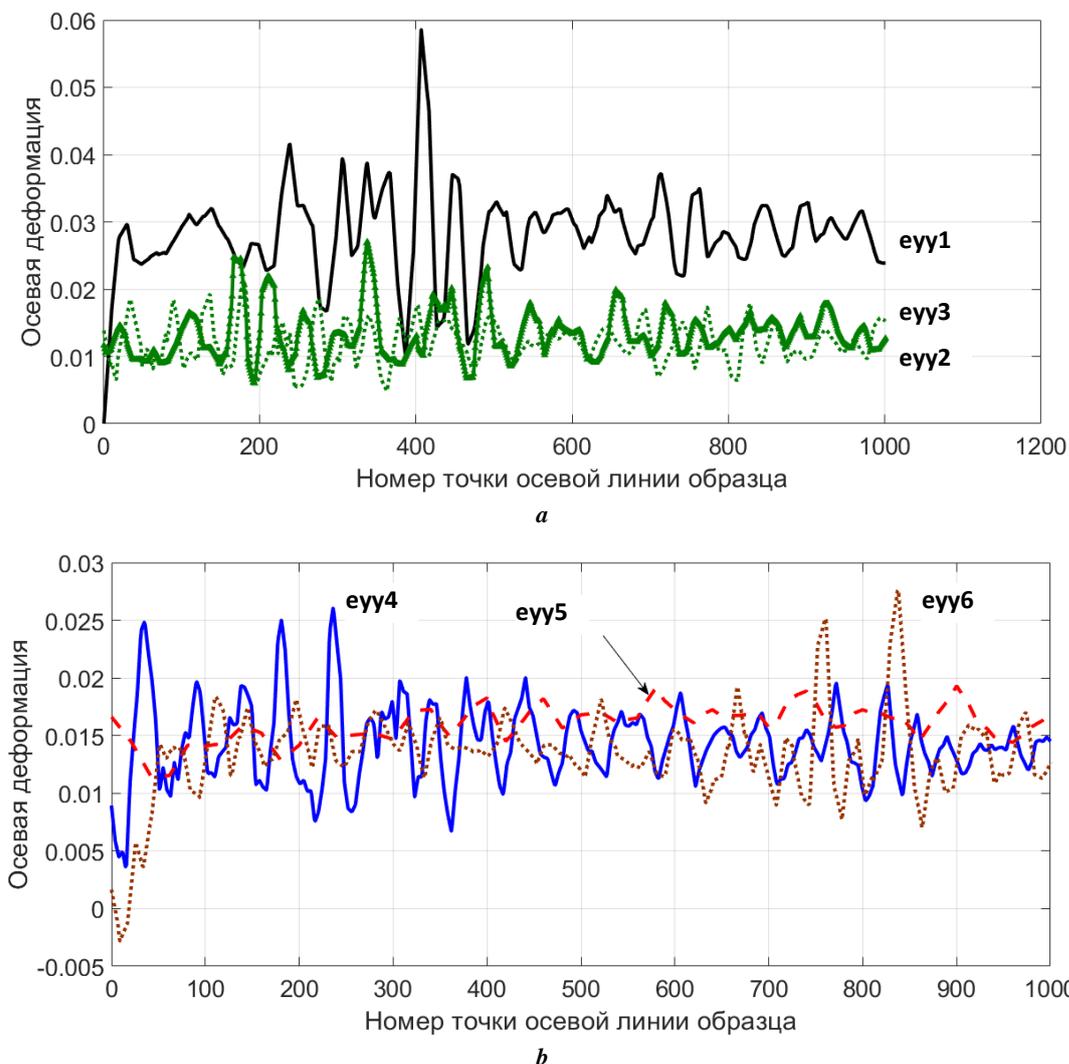


Рис. 5. Распределение продольной деформации ϵ_{yy} вдоль центральной оси образцов для максимальной деформации:
a – образцы 1–3; **b** – образцы 4–6
Fig. 5. Distribution of axial deformation ϵ_{yy} along the central axis of specimens for maximal deformation:
a – specimens 1–3; **b** – specimens 4–6

измерения. Выполнена оценка необходимого разрешения оптической системы по параметрам контролируемого образца.

Разработана, изготовлена и собрана установка для исследования распределения деформаций оптическим методом с использованием полимерных образцов цилиндрической формы с применением схемы оптического контроля цифровыми камерами. Постобработка полученных изображений заключалась в устранении дисторсии с учетом калибровочных коэффициентов.

Апробированы различные параметры нанесения спекла на образцы для съемки с учетом применяемого способа нанесения краски из пульверизатора, включая расстояние, время и характер разбрызгивания. Определены размеры пятен, нанесенных на заготовку, плотность их распределения.

Наиболее перспективным по точности определения деформаций является спекл, который характеризуется большой вариативностью размеров пятен. На большой длине образца это дает возможность обеспечить уникальность рисунка, попадающего в окно корреляции, что позволяет избежать ошибок в расчете.

Сглаживание изображения перед началом расчетов обеспечивает снижение влияния шума из-за резких перепадов на границе пятен.

Выбранные параметры спекла и соответствующая технология его нанесения позволяют обеспечить при использовании данной методики определение распределения деформаций по поверхности деформируемого образца с минимальной погрешностью. Это позволит при разработке технологий, связанных с осевым деформированием заготовок, определить параметры технологических операций, которые формируют максимально однородное распределение пластических деформаций по всей их длине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sciammarella C.A. A Review: Optical Methods That Evaluate Displacement // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. 2019. Vol. 12. P. 23–52. DOI: [10.1007/978-3-319-97481-1_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97481-1_3).
- Sutton M.A., Ortu J.-J., Schreier H. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. USA: Springer Science, 2009. 321 p. DOI: [10.1007/978-0-387-78747-3](https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3).
- Miikki K., Karakoc A., Rafiee M., Lee D.W., Vapaavuori J., Tersteegen J., Lemetti L., Jouni P. An open-source camera system for experimental measurements // SoftwareX. 2021. Vol. 14. Article number 100688. DOI: [10.1016/j.softx.2021.100688](https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100688).
- Blaber J., Adair B., Antoniou A. Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software // Experimental Mechanics. 2015. Vol. 55. № 6. P. 1105–1122. DOI: [10.1007/s11340-015-0009-1](https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1).
- Turner D.Z. An overview of the gradient-based local DIC formulation for motion estimation in DICe. Sandia Report. 2016. DOI: [10.2172/1561808](https://doi.org/10.2172/1561808).
- Belloni V., Ravanelli R., Nascetti A., Rita M.Di., Mattei D., Crespi M. Py2DIC: A New Free and Open Source Software for Displacement and Strain Measurements in the Field of Experimental Mechanics // Sensors (Switzerland). 2019. Vol. 19. № 18. Article number 3832. DOI: [10.3390/s19183832](https://doi.org/10.3390/s19183832).
- Golasiński K., Pieczyńska E.A., Maj M., Staszczak M., Świec P., Furuta T., Kuramoto S. Investigation of strain rate sensitivity of Gum Metal under tension using digital image correlation // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2020. Vol. 20. № 2. Article number 53. DOI: [10.1007/s43452-020-00055-9](https://doi.org/10.1007/s43452-020-00055-9).
- Sutton M.A., Matta F., Rizzo D., Ghorbani R., Rajan S., Mollenhauer D.H., Schreier H.W., Lasprilla A.O. Recent Progress in Digital Image Correlation: Background and Developments since the 2013 W M Murray Lecture // Experimental Mechanics. 2017. Vol. 57. № 1. P. 1–30. DOI: [10.1007/s11340-016-0233-3](https://doi.org/10.1007/s11340-016-0233-3).
- Oberg M.B.A.M., de Oliveira D.F., Goulart J.N.V., Anflor C.T.M. A novel to perform a thermoelastic analysis using digital image correlation and the boundary element method // International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2020. Vol. 15. № 1. Article number 1. DOI: [10.1186/s40712-019-0115-4](https://doi.org/10.1186/s40712-019-0115-4).
- Расторгуев Д.А., Семенов К.О., Дёма Р.Р., Амиров Р.Н., Романенко Е.Ф., Латыпов О.Р., Матвеев П.А. Технологическое обеспечение равномерности пластической деформации при термосиловой обработке // Технология металлов. 2021. № 8. С. 24–32.
- Панин С.В., Любутин П.С. Верификация метода оценки деформации на мезоуровне, основанного на построении полей векторов перемещений участков поверхности // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 2. С. 69–80.
- Панин С.В., Титков В.В., Любутин П.С. Автоматический выбор размера ядра корреляции в задаче оценки деформации материалов методом корреляции цифровых изображений // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20. № 2. С. 65–78.
- Joseph S.H. Markings for Image-Based Deformation Measurement on a Torsion Test Machine // Strain. 2009. Vol. 45. № 2. P. 139–148. DOI: [10.1111/j.1475-1305.2008.00425.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00425.x).
- Dong Y.L., Pan B. A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation // Experimental Mechanics. 2017. Vol. 57. № 8. P. 1161–1181. DOI: [10.1007/s11340-017-0283-1](https://doi.org/10.1007/s11340-017-0283-1).
- Bomarito G.F., Hochhalter J.D., Ruggles T.J., Cannon A.H. Increasing accuracy and precision of digital image correlation through pattern optimization // Optics and Lasers in Engineering. 2017. Vol. 91. P. 73–85. DOI: [10.1016/j.optlaseng.2016.11.005](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.11.005).
- Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
- Надеждин К.Д., Шарнин Л.М., Кирпичников А.П. Визуальные методы определения деформаций и напряжений на поверхности испытываемых конструкций // Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19. № 12. С. 143–146.
- Любутин П.С., Панин С.В. Измерение деформации на мезоуровне путем анализа оптических изображений поверхности нагруженных твердых тел // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 6. С. 158–164.
- Schreier H.W., Braasch J.R., Sutton M.A. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity

- interpolation // *Optical Engineering*. 2000. Vol. 39. № 11. P. 2915–2921. DOI: [10.1117/1.1314593](https://doi.org/10.1117/1.1314593).
20. G'sell C., Hiver J.M., Dahoun A. Experimental characterization of deformation damage in solid polymers under tension, and its interrelation with necking // *International Journal of Solids and Structures*. 2002. Vol. 39. № 13-14. P. 3857–3872. DOI: [10.1016/S0020-7683\(02\)00184-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00184-1).
- ## REFERENCES
- Sciammarella C.A. A Review: Optical Methods That Evaluate Displacement. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 2019, vol. 12, pp. 23–52. DOI: [10.1007/978-3-319-97481-1_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97481-1_3).
 - Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier H. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. USA, Springer Science Publ., 2009. 321 p. DOI: [10.1007/978-0-387-78747-3](https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3).
 - Miikki K., Karakoc A., Rafiee M., Lee D.W., Vapaavuori J., Tersteegen J., Lemetti L., Jouni P. An open-source camera system for experimental measurements. *SoftwareX*, 2021, vol. 14, article number 100688. DOI: [10.1016/j.softx.2021.100688](https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100688).
 - Blaber J., Adair B., Antoniou A. Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. *Experimental Mechanics*, 2015, vol. 55, no. 6, pp. 1105–1122. DOI: [10.1007/s11340-015-0009-1](https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1).
 - Turner D.Z. *An overview of the gradient-based local DIC formulation for motion estimation in DICe*. Sandia Report. 2016. DOI: [10.2172/1561808](https://doi.org/10.2172/1561808).
 - Belloni V., Ravanelli R., Nascetti A., Rita M.Di., Mattei D., Crespi M. Py2DIC: A New Free and Open Source Software for Displacement and Strain Measurements in the Field of Experimental Mechanics. *Sensors (Switzerland)*, 2019, vol. 19, no. 18, article number 3832. DOI: [10.3390/s19183832](https://doi.org/10.3390/s19183832).
 - Golasiński K., Pieczyska E.A., Maj M., Staszczak M., Świec P., Furuta T., Kuramoto S. Investigation of strain rate sensitivity of Gum Metal under tension using digital image correlation. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, article number 53. DOI: [10.1007/s43452-020-00055-9](https://doi.org/10.1007/s43452-020-00055-9).
 - Sutton M.A., Matta F., Rizos D., Ghorbani R., Rajan S., Mollenhauer D.H., Schreier H.W., Lasprilla A.O. Recent Progress in Digital Image Correlation: Background and Developments since the 2013 W M Murray Lecture. *Experimental Mechanics*, 2017, vol. 57, no. 1, pp. 1–30. DOI: [10.1007/s11340-016-0233-3](https://doi.org/10.1007/s11340-016-0233-3).
 - Oberg M.B.A.M., de Oliveira D.F., Goulart J.N.V., Anflor C.T.M. A novel to perform a thermoelastic analysis using digital image correlation and the boundary element method. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2020, vol. 15, no. 1, article number 1. DOI: [10.1186/s40712-019-0115-4](https://doi.org/10.1186/s40712-019-0115-4).
 - Rastorguev D.A., Semenov K.O., Dema R.R., Amirov R.N., Romanenko E.F., Latypov O.R., Matveev P.A. Process support for uniformity of plastic deformation during thermal force treatment. *Tekhnologiya metallov*, 2021, no. 8, pp. 24–32.
 - Panin S.V., Lyubutin P.S. Verification of a method of deformation estimation at the mesolevel on the basis of constructing displacement vector fields on the surface. *Fizicheskaya mezhmekhanika*, 2005, vol. 8, no. 2, pp. 69–80.
 - Panin S.V., Titkov V.V., Lyubutin P.S. Automatic determination of subset size in the problem of estimation of material strain by digital image correlation method. *Vychislitelnye tekhnologii*, 2015, vol. 20, no. 2, pp. 65–78.
 - Joseph S.H. Markings for Image-Based Deformation Measurement on a Torsion Test Machine. *Strain*, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 139–148. DOI: [10.1111/j.1475-1305.2008.00425.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00425.x).
 - Dong Y.L., Pan B. A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation. *Experimental Mechanics*, 2017, vol. 57, no. 8, pp. 1161–1181. DOI: [10.1007/s11340-017-0283-1](https://doi.org/10.1007/s11340-017-0283-1).
 - Bomarito G.F., Hochhalter J.D., Ruggles T.J., Cannon A.H. Increasing accuracy and precision of digital image correlation through pattern optimization. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, vol. 91, pp. 73–85. DOI: [10.1016/j.optlaseng.2016.11.005](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.11.005).
 - Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. *Opticheskie izmereniya* [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 264 p.
 - Nadezhdin K.D., Sharnin L.M., Kirpichnikov A.P. Visual methods of identifying deformations and stresses on the surfaces of tested structures. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 12, pp. 143–146.
 - Lyubutin P.S., Panin S.V. Mesoscale measurement of strains by analyzing optical images of the surface of loaded solids. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2006, vol. 47, no. 6, pp. 905–910.
 - Schreier H.W., Braasch J.R., Sutton M.A. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation. *Optical Engineering*, 2000, vol. 39, no. 11, pp. 2915–2921. DOI: [10.1117/1.1314593](https://doi.org/10.1117/1.1314593).
 - G'sell C., Hiver J.M., Dahoun A. Experimental characterization of deformation damage in solid polymers under tension, and its interrelation with necking. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, vol. 39, no. 13-14, pp. 3857–3872. DOI: [10.1016/S0020-7683\(02\)00184-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00184-1).

Identification of deformations of cylindrical specimens by optical method using the technique of digital image correlation

© 2022

*Dmitry A. Rastorguev**¹, PhD (Engineering),
assistant professor of Chair “Equipment and Technologies of Machine Building Production”
*Kirill O. Semenov*², postgraduate student of Chair “Equipment and Technologies
of Machine Building Production”

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

*E-mail: rast_73@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6298-1068>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0397-4009>

Received 09.02.2022

Accepted 06.05.2022

Abstract: A provision of location tolerances and their retention in the postoperative period is one of the main hard-hitting process tasks when producing long-length low-rigidity shaft-type parts. Mixed treatment – tensile straightening or thermal-power treatment is one of the technological methods intended to provide this group of geometrical indicators, including axle linearity. The efficiency improvement of this technology is impossible without knowing the features of the formation of plastic deformations distribution along the length of long-length blank parts. The paper considers the application of an optical method for controlling deformation on the surface using the method of digital image correlation at axial deformation of cylindrical parts. The work describes an experimental device for optic control of deformations when loading a specimen using digital cameras. The authors studied the influence of various modes of paint deposition to a sample (deposition rate, distance, deposition mode – continuous or pulsed) on the features of a produced speckle in the form of random distribution of mixed-size paint spots over the specimen surface; obtained histograms of the intensity distribution of various speckles. The authors carried out the experiments to identify deformations based on the technology of the local gradient digital image correlation method for the specimens of polymer tubes with different speckle types. The study identified the distribution of the deformation over the length of samples within the deformable area selected for analysis with the specified degree of smoothing provided by choice of correlation kernel size and the choice of its displacement step for fixing deformation processes with a precise error. The authors obtained distributions of axial deformations along the length of specimens and errors of deformations determination depending on a speckle nature. The study specifies necessary speckle parameters ensuring minimal error for long-length samples up to 200 mm in length and appropriate technology for paint depositing. It is a speckle with a wide range of spot sizes rarefied with their locations and the Gaussian filter image smoothing before the analysis.

Keywords: digital image; digital image correlation; correlation analysis; speckle; axial deformation; optical control.

Acknowledgements: The study was financially supported by the Russian Foundation for basic Research within the scientific project No. 20-38-90148.

For citation: Rastorguev D.A., Semenov K.O. Identification of deformations of cylindrical specimens by optical method using the technique of digital image correlation. *Frontier Materials & Technologies*, 2022, no. 2, pp. 74–83. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-74-83.