

УДК 621.78.01

ОПТИЧЕСКИЙ СПОСОБ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

© 2024 К.О. Семенов

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

Статья поступила в редакцию 07.12.2024

В статье рассматривается методика контроля деформаций для исследования особенностей их локализации по длине осесимметричных длинномерных образцов при растяжении. Это актуально для процесса термосиловой обработки, который заключается в использовании заданного силового и температурного воздействий на заготовку для обеспечения ее прямолинейности с выравниванием остаточных технологических напряжений. Так как процесс идет в пластической зоне нагружения и вытягивание заготовки происходит при поперечной деформации по сечениям, для формирования заданной точности размеров и равномерного распределения припуска на последующую механическую обработку необходимо знать закономерности изменения деформаций с учетом параметров нагружения. Для фиксации распределения полей смещений при нагружении используется оптический способ контроля деформации по поверхности на основе метода корреляции цифровых изображений. На основе анализа серий последовательных цифровых снимков деформируемого образца, предварительно подготовленного для съемки путем нанесения на него спекла в виде случайно распределенных черных точек краски на белой матовой поверхности, с использованием локального градиентного способа корреляции цифровых изображений фиксируется поле смещений и деформаций для заданных областей. Приведены результаты исследования влияния вида спекла на точность определения смещений и деформаций. Рассматривается методика получения и обработки цифровых снимков, включая преобразование в полутоновое изображение, коррекцию дисторсии и повышение резкости изображения с использованием фильтров. Приведены результаты исследований по определению деформаций с использованием оптимальных параметров размера окна корреляции, шага его смещения, порога чувствительности по градиенту освещенности, параметра используемого фильтра Гаусса. Использование предложенного способа контроля обеспечивает возможность отслеживания с необходимой точностью деформаций по длине цилиндрических длинномерных заготовок, что способствует выбору технологических режимов термосиловой обработки по величине и скорости деформации с целью обеспечения максимально равномерного распределения пластической деформации.

Ключевые слова: Термосиловая обработка, цифровой снимок, корреляционный анализ, спекл, деформация, оптический контроль.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-6-86-95

EDN: HDSSPY

ВВЕДЕНИЕ

Эффективным технологическим способом обеспечения необходимых конструктивных параметров и физико-механических свойств деталей в процессе их изготовления является использование термосиловой обработки (ТСО) заготовки [1], которое заключается в одновременном приложении силового и температурного воздействий [2]. Данный технологический метод направлен на формирование геометрической точности (исправление параметра не прямолинейности оси заготовки) и выравнивание остаточных технологических напряжений. Это благоприятно сказывается на последующей механической обработке за счет формирования равномерного припуска и максимального снижения коробления в межоперационный период.

*Семенов Кирилл Олегович, соискатель научной степени.
E-mail: semen-tgu@yandex.ru*

Для этого необходимо в процессе деформирования заготовки выйти в зону текучести при растяжении. Осевые пластические деформации сопровождаются поперечными, что при их неравномерности ведет к искажению продольного профиля заготовки и формированию неравномерного припуска. Для обеспечения равномерности распределения пластических деформаций вдоль оси заготовки необходимо знать закономерности их изменения при деформировании с учетом технологических факторов, распределения температурного поля.

Возникает задача контроля деформаций заготовки в процессе деформирования. Одним из наиболее эффективных методов реализации этого является использование оптических методов контроля.

Современные подходы в области оптических методов контроля основаны на применении цифровых устройств с фиксацией изображений

и находят широкое применение в научных исследованиях и промышленности. Это касается проведения различных исследований при проектировании новых изделий с контролем распределения полей деформаций и напряжений, изучении особенностей деформационных процессов новых материалов, контроля качества изготовления.

Методы оптического контроля базируются на использовании компьютерного или машинного зрения. Оно заключается в извлечении необходимой пространственной информации, включая объемную (3D), из изображений, снятых цифровыми камерами для различных целей.

Назначение систем компьютерного зрения самое разнообразное. Они могут использоваться для управления технологическими системами, включая робототехнические [1, 2]. Системы компьютерного зрения являются базовым элементом контура управления автономными транспортными средствами [3, 4]. В промышленности для контроля различных технологических процессов [5], в медицине для анализа медицинских изображений [6] данные системы используются достаточно давно и эффективно.

Одной из основных задач компьютерного зрения – определение геометрических параметров контролируемого объекта, включая конфигурацию, размеры, состояние поверхности. Подходы для этого существуют самые разнообразные. Определение формы по затенению [7, 8] чувствительно к условиям освещения.

Метод [9], который использует взаимосвязь между расстоянием от объекта до камеры и глубиной резкости используется для контроля текстуры и измерения шероховатости поверхности.

Стереозрение – метод, который использует две камеры для получения по 2D-изображениям 3D-изображений объекта с помощью триангуляции [10]. Методы измерения формы при стереозрении были также адаптированы для измерения деформаций в экспериментальной механике, где используется метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) (digital image correlation – DIC) [11]. Основы метода КЦИ описаны в [12]. В [13, 14] рассмотрено применение КЦИ для исследований принципов мезомеханики с локализацией деформаций.

В экспериментальной механике твердого тела 2D КЦИ используется очень широко [15–19]. Исследованы вопросы влияния оптических систем, смещения объектов из плоскости съемки, методов интерполяции деформаций и напряжений по результатам КЦИ. Основой метода является регистрация смещения точек на поверхности образца, созданных путем распыления, печати или химического процесса [20], Сравнивая последовательно изображения образца при

деформации, можно вычислить перемещения и их градиенты.

Для определения деформации вне плоскости съемки используется методика 3D КЦИ [21, 22], в которой для наблюдения за образцом с разных углов обзора используются, по меньшей мере, две камеры. Таким образом, проблема сопоставления изображений включает в себя корреляцию не только изображений для различных состояний деформации, полученных одной и той же камерой (а именно, временное согласование), но также изображений, полученных разными камерами для одних и тех же состояний деформации (а именно, стерео-согласование).

Одним из основных этапов проведения съемки является калибровка – это процесс определения всех необходимых параметров оптической системы для формирования не искаженного изображения. Для этого необходимо использовать эталон, дающий предварительные знания о координатах точек, фиксируемых на снимке. Для этого используют калибровочную сетку с точно известными размерами опорных точек, фиксируемую в различных положениях в поле обзора камеры, и определяют параметры камеры, чтобы наилучшим образом соответствовать спроецированным и измеренным изображениям сетки [23].

Метод КЦИ применяется в исследовании материалов при оценке прочности, механизмов разрушений [24].

Исследования по локализации деформаций в области мезомеханики основаны на применении оптических методов определения полей распределения деформаций [25]. Объект исследования плоский образец малых размеров, а исследуемая зона ограничена. В [26] размер такой зоны определяется размерами группы зерен деформируемого материала. Есть пример [27] контроля деформации шейки с использованием ее видео фиксации. В [28] также исследуется локализация с шагом 5 мм и определяется размерами зерен. В [29] получены распределения деформаций при растяжении плоских титановых образцов на измерительной базе 0,28 мм.

Преимущество метода КЦИ в относительно не затратном аппаратном и программном обеспечении, невысоких требованиях к условиям проведения, что делает его доступным для использования в производственных условиях при высокой точности определение распределений деформаций.

Цель – апробировать метод оптического контроля деформаций по длине осесимметричного образца при его нагружении при термосиловой обработке и с учетом параметров расчета и условий проведения контроля оценить пригодность для технологических исследований.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для апробации способа оптического контроля деформации цилиндрического образца при растяжении во время термосилового процесса проведен цикл экспериментов на установке, которая состоит из силового каркаса, на нижнем основании которого крепится один из концов образца. На верхней части каркаса установлен домкрат грузоподъемностью 20 кН, который перемещает подвижную силовую раму. На нижней поперечине подвижной рамы закрепляется верхний конец образца. Образец представляет собой цилиндрический стержень длиной 300 мм диаметром от 8 до 16 мм из материалов стали 35 и сплава 12X18H10T. На двух концах образца предварительно нарезается метрическая резьба для фиксации гайками с каждого конца.

На образец с одной стороны наносились риски мерным инструментом с одинаковым шагом 10 мм для дополнительного контроля удлинений до и после растяжения. Подготовка самого образца с нанесением фона из белой матовой краски, а затем нанесения пятен стекла с использованием разбрызгивания из пульверизатора. С другой стороны образец покрывался сначала матовой белой краской, затем по окрашенной белой поверхности наносился точечный рисунок разбрызгиванием черной краской с заданными параметрами нанесения (расстояние и время нанесения). Это приводит к формированию различных размеров пятен, а также плотности их заполнения, формируя спекл, который используется для контроля деформации оптическим способом.

Для контроля деформации образца использовалась цифровая камера Basler acA1440-73 с интерфейсом GigE, CMOS-матрицей IMX273 от Sony при разрешении 1,6 Мпикс. На фиксированном расстоянии до объекта съемки (650 мм) обеспечивалась максимальная резкость. Для исправления искажений, вносимых оптической системой, используется предварительная калибровка для определения внутренних и внешних параметров цифровых камер. При этом определяются фокусное расстояние, центр положения снимка, коэффициенты радиальной и тангенциальной дисторсии. При помощи двух последних параметров производилась корректировка изображения для исправления геометрических искажений. Для снижения влияния шума на изображении применялась сглаживающая фильтрация.

При съемке задавались параметры по выдержке, для обеспечения контрастного изображения и чистоты для обеспечения необходимого временного промежутка между последовательными кадрами для фиксации смещения точек рисунка, нанесенного на образец.

Перед растяжением образца производился его нагрев. Он осуществлялся при помощи промышленных фенов с рабочей температурой нагрева воздуха до 600 °С в течение 5 мин.

После этого производилось растяжение до величин 10, 15, 20 мм. Для образца это составляет 4, 6,1 и 8,2 %. Из-за местной и общей конструктивной, а также контактной деформации элементов силового контура установки, упругой и температурной деформации образца фактическая деформация меньше в зависимости от условий нагружения. Скорость деформации задавалась скоростью перемещения рукоятки домкрата и имела переменный характер, что отражалось на графиках осевых смещений в виде волнообразных кривых. Одно перемещение рукоятки приводит к 1,5 мм осевого выдвигания штока.

Растяжение образца проводилось до заданной величины с одновременным получением серии изображений. С учетом полученных калибровочных коэффициентов проводилась корректировка радиальной дисторсии полученных изображений. После этого скорректированные изображения подвергались фильтрации с целью снижения шума на изображении и повышения резкости и контрастности.

Набор изображений загружался в программу DICe [33], реализующую локальный метод КЦИ. В полученной серии выбирается начальное изображение не деформированного образца. Остальные принимаются как изображения последовательно деформируемого образца.

В программе DICe при расчете смещений и деформаций задавались 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 [34].

Результаты расчета визуализируются путем построения смещения и деформаций для отдельных контрольных точек, указанных непосредственно в зоне анализа в программе DICe. Форма функции в данном случае выбиралась первого порядка только для смещений.

Изображения поверхности образца после обработки методом КЦИ и передачи полученных массивов по деформациям и смещениям по поверхности или указанных областей визуализируются через программу ParaView [35].

Метод КЦИ заключается в последовательном сравнении снимков деформируемого образца. В локальном методе анализируется ограниченная область изображения, задаваемая ядром или окном корреляции, которое с заданным шагом смещается по исследуемой области изображения деформируемой зоны. В каждом из положений ищется максимальное совпадение области, взятой из исходного изображения с областью изображения деформированного образца на ос-

нове определения максимального коэффициента корреляции или минимальной квадратичной разности интенсивности освещения пикселей в окне корреляции. Смещение окна корреляции по отношению к исходному положению дает векторы смещения по осям x и y . В случае использования функции формы второго порядка определяются дополнительно деформации самого окна, что позволяет вычислить сдвиговые деформации. Данные параметры определяются в ходе итерационного алгоритма, который минимизирует функцию разности параметров исходного и деформированного изображений. При выполнении данного алгоритма проводится интерполяция параметров смещения для выполнения операции дифференцирования. Основой алгоритма КЦИ является вычисление взаимной корреляционной функции окна корреляции исходного изображения при его перемещении по полю изображения деформированного образца [30]. Новое определенное положение окна корреляции показывает его смещение из начального положения $x(x_i, y_i)$ в новое $w(z, x)$ [31].

Если смещенное окно не изменяется по размеру и форме, функция формы используется нулевого порядка:

$$z_1(x_i, y_i) = u, \quad (1)$$

$$z_2(x_i, y_i) = v, \quad (2)$$

где x_i, y_i – координата точки на изображении; u и v – смещение по осям x и y . Большинство моделей деформации для 2D КЦИ обычно включают u и v и их частные производные. Для использования функции формы нулевого порядка необходимо, чтобы окно корреляции было мало, чтобы деформацию в его пределах можно было считать однородной.

Реализация сравнения двух окон проводится путем оптимизации нормированной с нулевым средним суммы квадратов разностей интенсивности соответствующих пикселей (zero-normalized summa of squared differences – ZNSSD):

$$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{[f(x_i, y_i) - f_m]}{\Delta f} - \frac{[g(x_i, y_i) - g_m]}{\Delta g} \right]^2, \quad (3)$$

где f_m, g_m – средняя интенсивность тона в пределах ядра корреляции деформированного и исходного изображений; $\Delta f, \Delta g$ – средне-квадратичное отклонение интенсивности тона; M – размер ядра корреляции. Для определения параметров смещения ищется вектор $w(z, x)$ через итерационное решение задачи оптимизации при минимизации параметра:

$$C_{ZNSSD.opt} = \arg \min \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{[f(w(x, z)) - f_m]}{\Delta f} - \frac{[g(x) - g_m]}{\Delta g} \right]^2. \quad (4)$$

Минимизация разницы параметров окна в

исходном изображении и изображении деформированного образца дает значение вектора $w(z, x)$, которое показывает текущее смещение рассматриваемого окна по координатам, что дает нам компоненты горизонтального и вертикального смещения.

Через эти параметры определяется значение деформаций:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right); \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial u}{\partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right). \end{aligned} \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения деформаций изображение поверхности деформируемого образца должно соответствовать определенным требованиям. Оно должно иметь покрытие рисунком (спекл), в виде случайного распределения точек определенного размера при заданном уровне контраста и интенсивности освещения. Специально полученный рисунок в виде случайно расположенных пятен представляет из себя реперные точки по которым далее ведут расчет.

Характер данного рисунка определяет погрешность определения деформаций.

При исследовании были получены результаты оценки погрешности для различных видов спекла (рис. 1), и их погрешности (рис. 2). Они получены при использовании техники разбрыз-

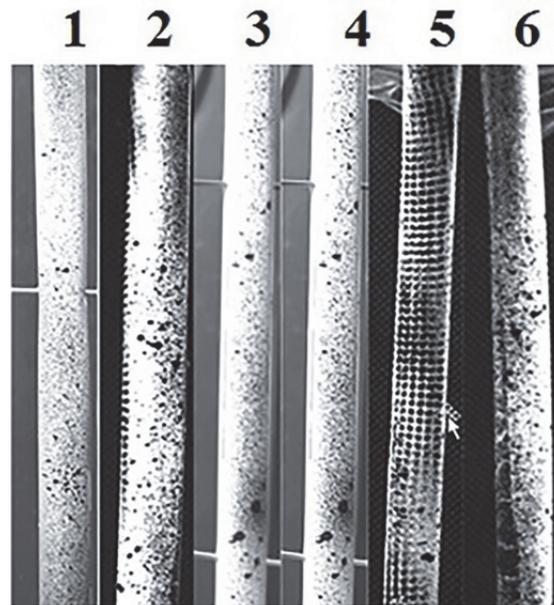


Рис. 1. Образцы со спеклом:

- 1 – с плотным заполнением; 2 – разреженным с большой вариацией размеров пятен;
- 3 – сглаженным разреженным; 4 – контрастным разреженным; 5 – с метками в виде ячеек;
- 6 – с вариацией освещения фона с большим диапазоном размеров

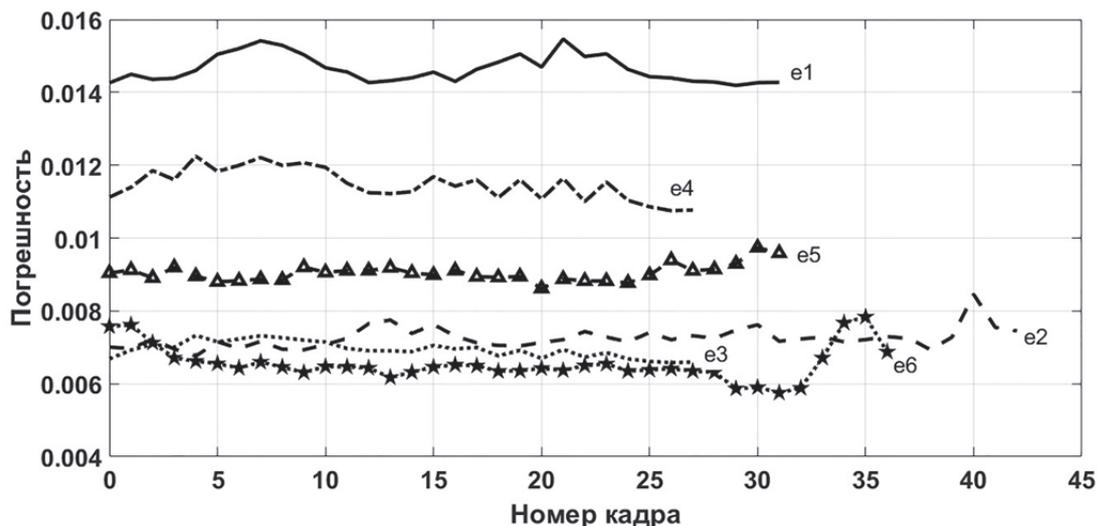


Рис. 2. Графики ошибки расчета деформации для контрольных точек при расчете деформаций образцов с различным спеклом и параметрами расчета

гивания из пульверизатора с разной длительностью и скоростью нанесения. Пятый образец имеет спекл, нанесенный через трафарет.

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

В результате получены оптимальные значения параметров расчета. На точность расчета влияют исходные параметры в виде размеров и

формы окна корреляций (оптимальное значение 21 пкс), шага его смещения (5 пкс), выбор функции формы для расчета параметров смещения и деформации окна корреляции (нулевого порядка – только смещения), выбор вида и параметров сглаживающего фильтра Гаусса (5 пкс). Кроме перечисленных параметров, на погрешность расчета деформаций влияют особенности изображения спекла, которые характеризуются определенным уровнем контраста и плотности заполнения пятнами, их размером, распределением размеров пятен. Наилучшие результаты у образцов 3 и 6.

Показаны результаты расчета продольных (рис. 3), поперечных смещений (рис. 4), поворотов, напряжений, поперечной (рис. 5), сдвиговой и продольной деформаций по результатам растяжения металлических образцов (рис. 6). В

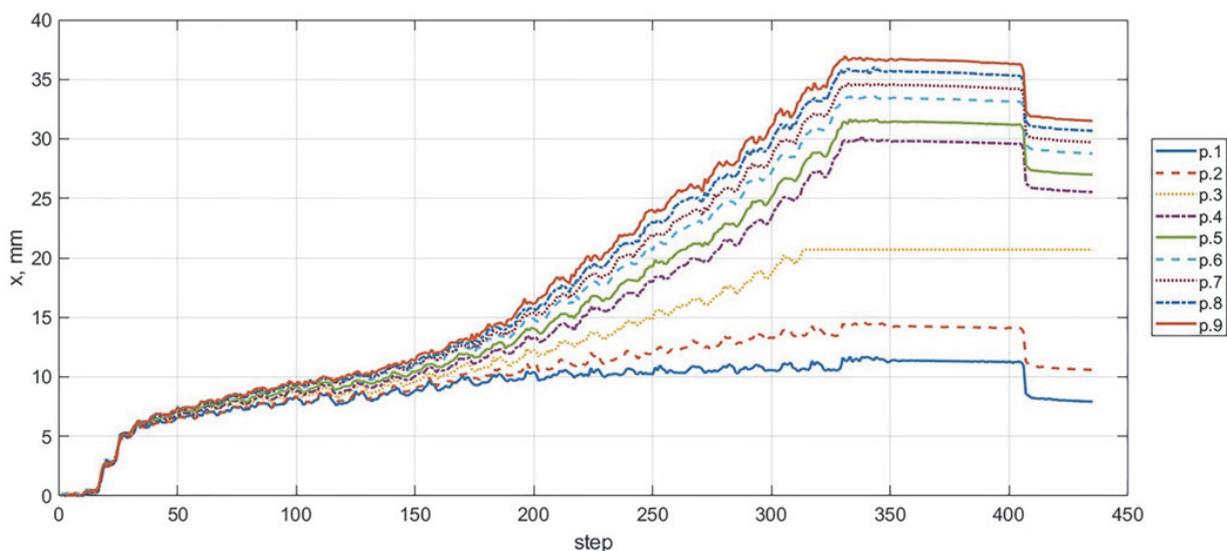


Рис. 3. Результаты расчета продольных смещений по контрольным точкам, указанным в области анализа

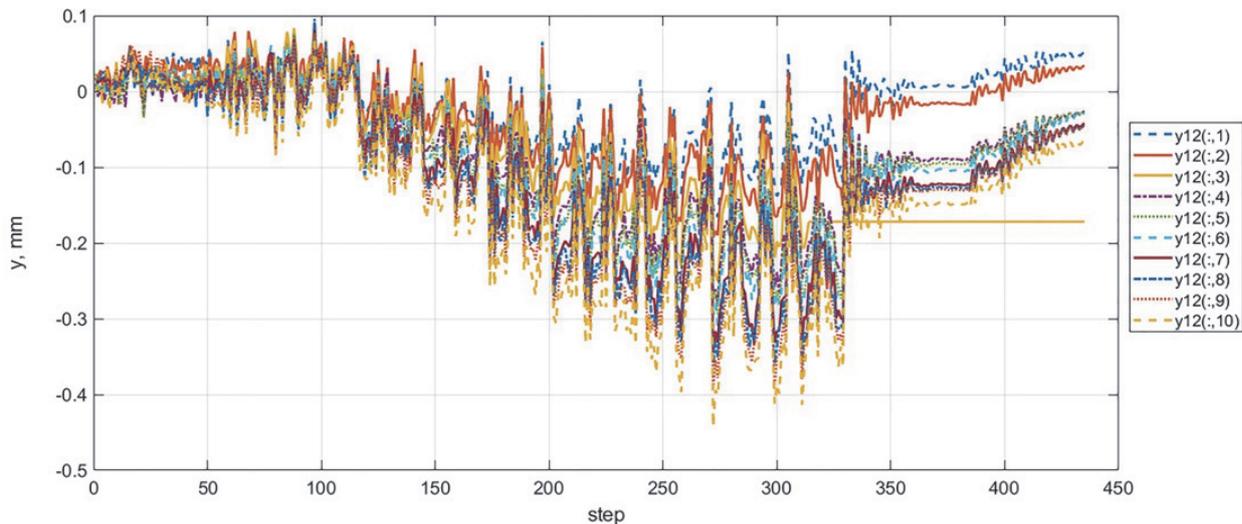


Рис. 4. Результаты расчета поперечных смещений по контрольным точкам, указанным в области анализа

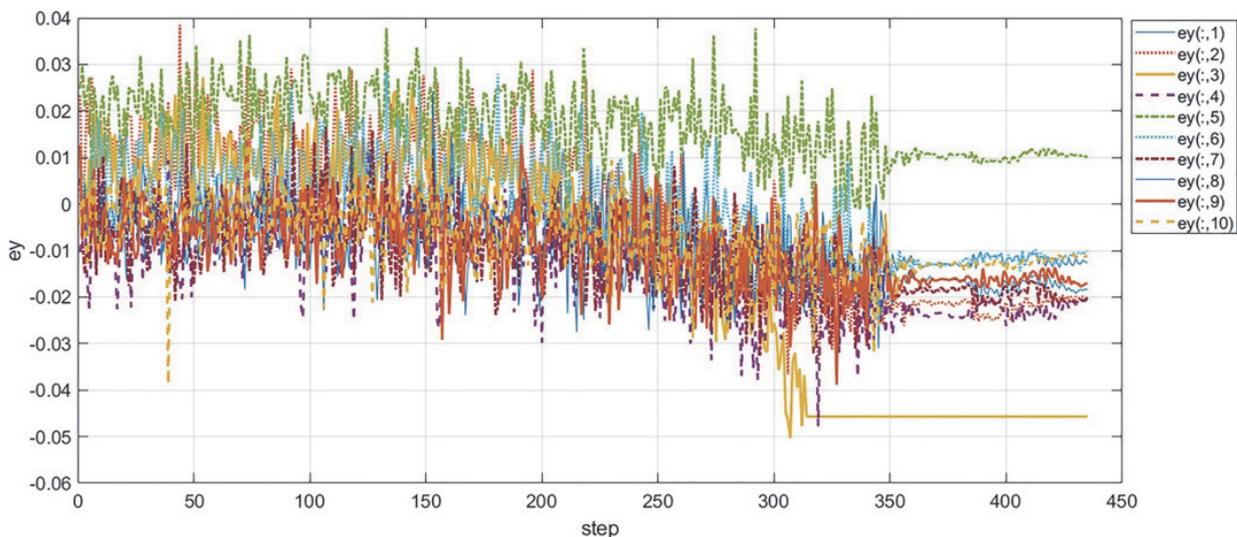


Рис. 5. Результаты расчета поперечных деформаций по контрольным точкам, указанным в области анализа

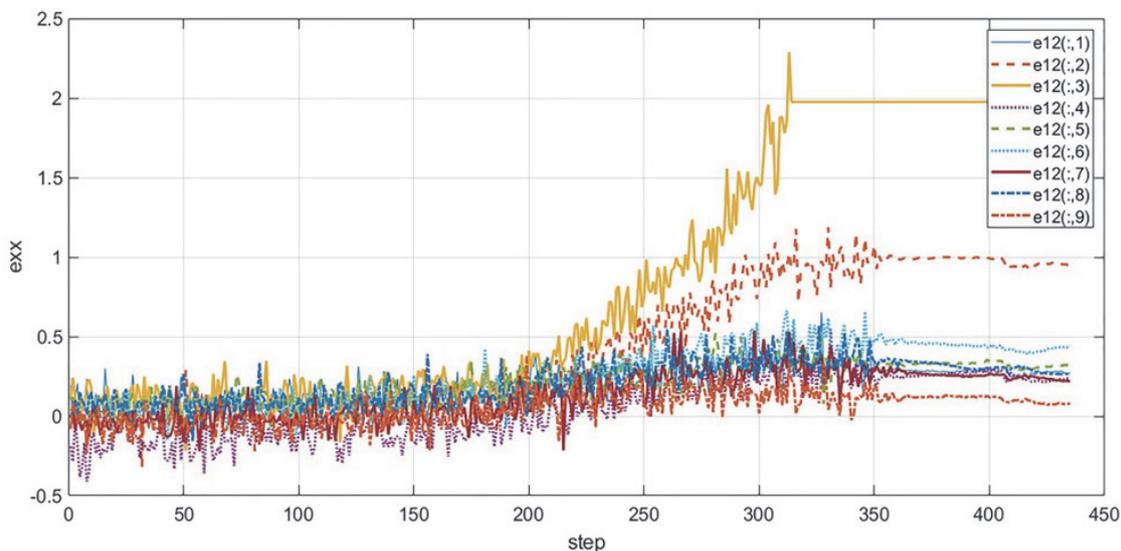


Рис. 6. Результаты расчета продольных деформаций по контрольным точкам, указанным в области анализа

легенде к рисункам указаны номера точек, выбранных в области анализа для визуализации результатов расчета. Весь массив результатов расчета по всей области анализа, полученных с заданным шагом смещения окна корреляции, сохранялся в отдельном файле и передавался в программу ParaView для отображения настроиваемых параметров вывода.

Волнообразный характер смещения точек, особенно заметный на графике продольных смещений определяется особенностями нагружения образца при помощи домкрата с ручным приводом.

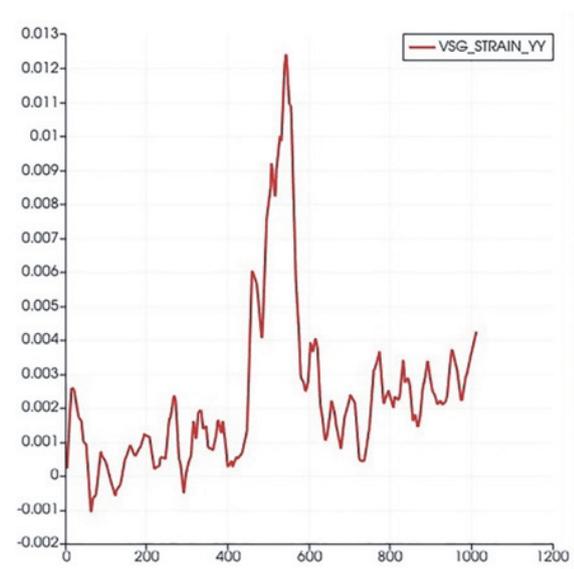
Результаты обработки изображений образца на кадрах 204 и 290 (рис. 7, рис. 8) по оси x точки расчета по длине образца.

Сопоставление результатов, полученных обработкой снимков методом КЦИ и по ре-

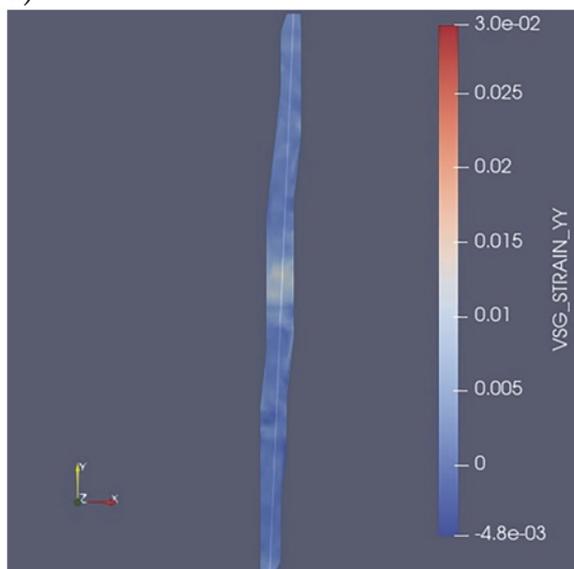
зультатам замеров по рискам итоговых распределений деформаций показывает их корреляцию 0,94.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки применимости рассмотренного метода контроля деформаций необходимо определить точность измерения деформаций, необходимую при исследовании ТСО. В предыдущих исследованиях [33] локализация по участкам оценивалась рисками. При погрешности самого измерительного инструмента в 0,05 мм и дополнительных погрешностей по позиционированию ножек штангенциркуля по рискам и погрешности считывания точность определения смещения составляла 0,1 мм. Для оптического контроля рисок с фик-

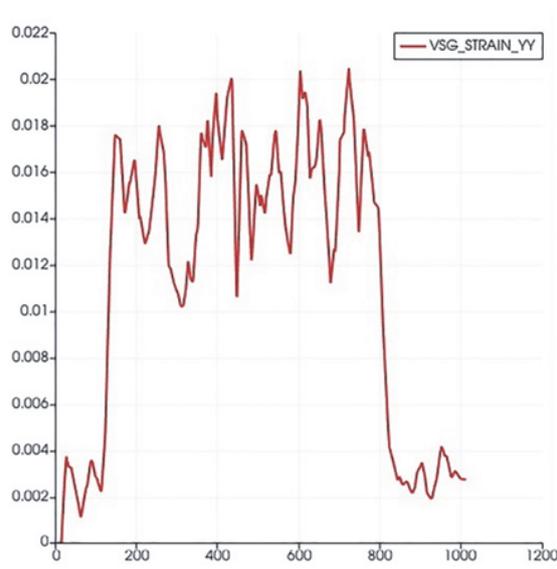


а)

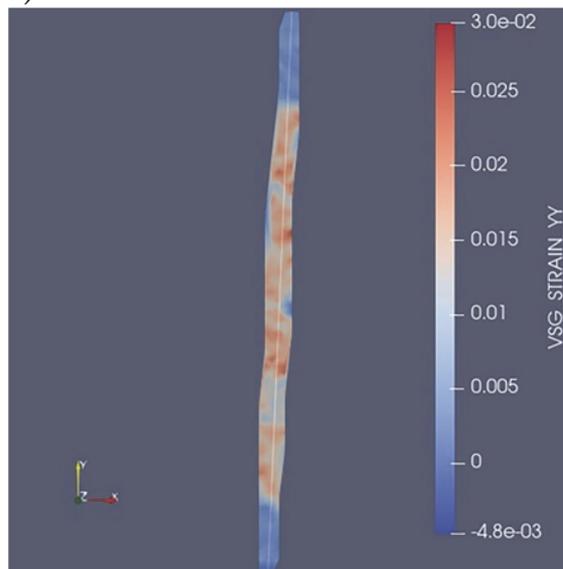


б)

Рис. 7. Деформация образца на кадре 240:
а – деформации вдоль указанной осевой линии;
б – поле деформаций



а)



б)

Рис. 8. Деформация образца на кадре 290:
а – деформация вдоль указанной осевой линии;
б – поле деформаций

сированным относительным положением камеры и образца до и после деформирования разрешение снимка составляло 20 пкс на 0,05 мм. Для образца длиной 200 мм это составляет 0,025 %. Погрешность измерения методом ЦКИ – максимальная 0,016 %, для оптимального рисунка спекла – 0,007 %.

Если принять технологические допуски деформированной заготовки по 15 качеству в осевом направлении погрешность будет составлять около 2 мм, в поперечном для диаметра 10 мм порядка 0,6 мм. Полученные значения погрешностей метода ЦКИ обеспечивают необходимую точность при исследовании особенностей локализации от параметров нагружения и нагрева заготовки. Даже учитывая возмущения от циркуляции нагретого воздуха при обдувании образцов потоком горячего воздуха для обеспечения заданной температуры образца.

Для технологических исследований с полноразмерными образцами соответствующими размерам заготовок, например осевого инструмента, анализ процесса деформирования является необходимым условием обеспечения точности размеров и расположения. Использование оптического метода контроля для отслеживания особенностей локализации деформации по длине образца является подходящим методом по точности и затратам. Это дает возможность при реализации ТСО длинномерных заготовок обеспечить пластическую деформацию такой величины, чтобы гарантированно войти в заданный диапазон. Так как только это приводит к максимальной равномерности распределения деформаций при полной проработке объема заготовки. С точки зрения технологической наследственности это приводит к формированию «технологического» барьера на пути передачи исходных погрешностей заготовки на готовое изделие. В первую очередь отклонения от прямолинейности и остаточных технологических напряжений.

Оптический контроль обеспечивает выход общей деформации образца на заданную стадию кривой пластического течения по наблюдению за его деформацией.

Метод характеризуется погрешностями систематического и случайного характера. Причинами возникновения этих погрешностей являются особенности аппаратного и программного обеспечения. Получение цифровых снимков камерами с использованием объективов, характеризующихся определенной разрешающей способностью, сопровождается искажениями и помехами. Описанная методика учитывает все эти факторы и позволяет снизить их негативное воздействие.

Сам процесс деформирования наблюдается в своей динамике. На рисунках 3-8 видны осо-

бенности перехода от локальной деформации в центре образца к общей деформации с возникновением все новых локальных зон деформаций. Они расширяются от центра заготовки к краям. Полученные результаты свидетельствуют о волнообразном характере деформации, которая начинается локализовано.

Использование методов оптического контроля обеспечивает наглядную визуализацию процессов деформации, протекающих в процессе нагружения. Использование предложенной методики цифровой корреляции изображений позволяет для открытого образца с использованием неконтактных методов нагрева производить съемку процесса растяжения с достаточной точностью, с точки зрения обеспечения технологических требований к данной операции.

Разработана методика и апробированы устройства для оценки распределения деформаций по длине для длинномерных цилиндрических образцов, в том числе с исходной кривизной, различным состоянием поверхности в режиме реального времени с заданной дискретностью для объективной фиксации процессов локализации пластической деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рассмотренном исследовании апробирован метод оптического контроля распределения полей деформаций образцов круглого сечения. Достоинством данного метода возможность оценки деформации по поверхности, вдоль линии, в отдельных точках в любом месте и количестве. Это дает возможность проводить оценку степени однородности деформации с учетом параметров ТСО. При использовании метода ЦКИ необходимо формировать спекл по поверхности и использовать параметры расчета (размеры окна корреляции, шаг, параметры сглаживающего фильтра), обеспечивающие минимальную погрешность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Groover, M.P., Weiss, M., Nagel, R.N. Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications. Industrial robotics: technology, programming, and applications. 1986. ISBN-10 007024989X
2. Haralick R., Shapiro L. Computer and robot vision. Addison-Wesley Pub. Co. 1993. ISBN: 9780201569438.
3. Buluswar S.D., Draper B.A. Color machine vision for autonomous vehicles // Int J Eng Appl Artif Intell. 1998. 11(2). 245-256.
4. Obstacle detection for unmanned ground vehicles: a progress report / Matthies L., Kelly A., Litwin T., Tharp G. // Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles '95 Symposium. 1995. 475-486. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-1021-7_52
5. Liu, Y., Li, S., Wang, J. A computer vision-based assistant system for the assembly of narrow cabin

**OPTICAL METHOD FOR MONITORING DEFORMATIONS
WHEN PROCESSING CYLINDRICAL WORKPIECES**

© 2024 K.O. Semenov

Togliatti State University, Togliatti, Russia

The article discusses a method for monitoring deformations to study the features of their localization along the length of axisymmetric long samples under tension. This is relevant for the process of thermal power processing, which consists in using a given force and temperature influence on the workpiece to ensure its straightness with equalization of residual technological stresses. Since the process takes place in the plastic loading zone and the workpiece is pulled out during transverse deformation along sections, in order to form a given dimensional accuracy and uniformly distribute the allowance for subsequent machining, it is necessary to know the patterns of changes in deformations taking into account the loading parameters. To record the distribution of displacement fields during loading, an optical method is used to control deformation on the surface based on the digital image correlation method. Based on the analysis of a series of sequential digital images of a deformable sample, previously prepared for shooting by applying speckle on it in the form of randomly distributed black dots of paint on a white matte surface, using a local gradient method of digital image correlation, a field of displacements and deformations is recorded for given areas. The results of a study of the influence of the type of speckle on the accuracy of determining displacements and deformations are presented. The technique of obtaining and processing digital images is considered, including conversion to a halftone image, distortion correction and image sharpening using filters. The results of studies on determining deformations using the optimal parameters of the size of the correlation window, the step of its displacement, the sensitivity threshold for the illumination gradient, and the parameter of the Gaussian filter used are presented. The use of the proposed control method provides the ability to monitor with the required accuracy deformations along the length of long cylindrical workpieces, which facilitates the selection of technological modes of thermal power processing in terms of the magnitude and rate of deformation in order to ensure the most uniform distribution of plastic deformation.

Keywords: Thermal power treatment; digital photograph; correlation analysis; speckle; deformation; optical control.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-6-86-95

EDN: HDSSPY

- products // *Int J Adv Manuf Technol.* 2015. 76. 281-293. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6274-9>
6. *Pun T., Gerig G., Ratib O.* Image analysis and computer vision in medicine // *Comput Med Imaging Graph.* 1994. 18(2). 85-96. [https://doi.org/10.1016/0895-6111\(94\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0895-6111(94)90017-5).
 7. *Kleffner D.A., Ramachandran V.S.* On the perception of shape from shading // *Perception & Psychophysics.* 1992. 52. 18-36.
 8. Shape-from-shading: a survey / *Zhang R., Tsai P.-S., Cryer J.E., Shah M.* // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21. 1999. 8. 690-706.
 9. *Nayar S.K.* Shape from focus system // *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.* 1992. 302-308.
 10. *Hartley R I., Sturm P.* Triangulation // *Computer Vision & Image Understanding.* 1997. 68(2). 146-157.
 11. *Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A.* Applications of digital image-correlation techniques to experimental mechanics // *Experimental Mechanics* 25. 1985. 232-244.
 12. *Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier H.* Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. Springer. 2009. 321 p. eBook ISBN 978-0-387-78747-3.
 13. *Lyubutin P.S., Panin S.V.* Measurement of deformation at the meso-level by analyzing optical images of the surface of loaded solids // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.* 2006. 47(6). 905-910. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10808-006-0131-z/>
 14. *Nadezhdin K.D., Sharnin L.M., Kirpichnikov A.P.* Visual methods for determining deformations and stresses on the surface of tested structures // *Bulletin of the Technological University.* 2016. 19(12). 143-146.
 15. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction / *Bruck H., McNeill S., Sutton M., Peters W.* // *Experimental Mechanics.* 1989. 29(3). 261-267.
 16. *Hung P.-C., Voloshin A.S.* In-plane strain measurement by digital image correlation // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.* 2003. 25(3).
 17. *Peters W.H., Ranson W.F.* Digital image techniques in experimental stress analysis // *Opt. Eng.* 1982. 21(3). 1982. 427-431. <https://doi.org/10.1117/12.7972925>.
 18. *Vendroux G., Knauss W.G.* Submicron deformation field measurements: Part 2. Improved digital image correlation // *Experimental Mechanics* 1998. 38(2). 86-92. DOI <https://doi.org/10.1007/BF02321649>
 19. Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement / *Yoneyama S., Kikuta H., Kitagawa A., Kitamura K.* // *Opt. Eng* 2006. 45(2). 023602.
 20. Development of patterns for digital image correlation measurements at reduced length scales / *Scrivens W.A., Luo Y., Sutton M.A., Collette S.A., Myrick M.L., Miney P., Colavita P.E., Reynolds A.P., Li X.* // *Experimental Mechanics* 2006. (47)1. 63-77.
 21. *Schreier H.W., Garcia D., Sutton M.A.* Advances in light microscope stereo vision // *Experimental Mechanics* 2004. 44(3). 278-288.
 22. Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision / *Sutton M., McNeill S., Helm J., Chao Y.* // In book: *Photomechanics, Topics in Applied Physics* (P. K. Rastogi, Ed.). Springer, Berlin. 2000. 323-372.
 23. *Garcia D., Orteu J., Penazzi L.* A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3D displacements: application to sheet metal forming // *Journal of Materials Processing Technology* 2002. 125-126. 736-742.
 24. *Luo P.-F., Chao Y.J., Sutton M.A.* Application of stereo vision to three-dimensional deformation analyses in fracture experiments // *Opt. Eng.* 1994. (33)3. 981-990.
 25. Development of the digital image correlation method for studying the processes of deformation and destruction of structural materials / *Lyubutin P.S., Panin S.V., Titkov V.V., Eremin A.V., Sunder R.* // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics.* 2019. 1. 88-109.
 26. Patterns of localization of deformation at large-scale levels in steel with the structure of tempered martensite / *Teplyakova L.A., Kozlov E.V., Ignatenko L.N., Popova N.A., Kasatkina N.F., Davydova V.A.* // *Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences.* 2000. 52(2-3). 221-223.
 27. *Tretyakov M.P., Wildeman V.E.* Experimental study of the laws of supercritical behavior taking into account the heterogeneity of sample deformation // *Mathematical modeling in natural sciences.* 2016. 1. 549-553.
 28. Modeling of the bands of localization of plastic deformation "chessboard" taking into account the statistical dispersion of the parameters of polycrystal grains / *Polyansky V.A., Belyaev A.K., Grishchenko A.I., Lobachev A.M., Modestov V.S., Pivkov A.V., Tretyakov D.A., Shtukin L.V., Semenov A.S., Yakovlev Yu.A.* // *Physical mesomechanics.* 2017. 20(6). 40-47.
 29. *Rekov A.M., Vichuzhanin D.I.* Density of strain distribution in the plane of the VT1-00 sample under tension // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics.* 2018. 3. 53-60.
 30. Recent Progress in Digital Image Correlation: Background and Developments since the 2013 W M Murray Lecture / *Sutton M.A., Fabio M., Rizos D.C., Ghorbani R., Rajan S., Mollenhauer D.H., Schreier H.W., Ortiz Lasprilla A.R.* // *Experimental Mechanics* 2017. 57. 1-30.
 31. A novel to perform a thermoelastic analysis using digital image correlation and the boundary element method / *Oberg M., Fernandes D, Goulart J., Anflor C.* // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering.* 2020. 15.
 32. *G'sell C., Hiver J.M., Dahoun A.M.* Experimental characterization of deformation damage in solid polymers under tension, and its interrelation with necking // *International Journal of Solids and Structures.* 2002. 39. 3857-3872.
 33. Technological support for the uniformity of plastic deformation during thermal-force treatment / *Rastorguev D.A., Semenov K.O., Dema R.R., Amirov R.N., Romanenko E.F., Latypov O.R., Matveev P.A.* // *Russian Metallurgy (Metally).* 2022. 2022(13). 1795-1800.