

УДК 620.165.79

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-70-86

*А.Н. Луценко¹, И.Н. Одинцев², А.В. Гриневиц¹, П.Б. Северов², Т.П. Плугатарь²***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛА
ОПТИКО-КОРРЕЛЯЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ**

Рассмотрены бесконтактные оптические методы определения полей перемещений на поверхности тел: корреляция цифровых изображений (КЦИ) и электронная цифровая спекл-интерферометрия (ЭЦСИ), с помощью которых исследуется деформированное состояние объектов не в отдельных точках, а в континуальном формате.

Метод КЦИ можно использовать для анализа деформированного состояния объекта в 2D- и 3D-формате. В частном варианте он может использоваться и в режиме виртуального оптического линейного тензометра. Данный метод позволяет отслеживать смещения одних и тех же физических точек на поверхности тела до и после его деформирования.

Метод ЭЦСИ относится к классу когерентно-оптических методов экспериментальной механики и является более точным инструментом для визуализации и численного описания полей перемещений.

Приводятся примеры использования данных методов для изучения полей остаточных напряжений и полей перемещений (деформаций) в окрестности отверстия-концентратора в образце.

Ключевые слова: деформация, остаточные напряжения, оптические методы, поля перемещений, численный анализ, корреляция, цифровое изображение.

Contactless optical methods of displacement fields determination on the surface of bodies were considered: correlation of digital images (CDI) and electron digital speckle-interferometry (EDSI). By these methods a strained state of objects is studied, not in separate points, but in a continual format.

CDI method may be used for a strained state analysis of an object in 2D- and 3D-format. Specifically, it may be used also in virtual optical linear tensometer mode. This method allows to trace displacements of the same physical points on body surface before and after its strain.

EDSI method belongs to the class of coherent and optical methods of experimental mechanics and is more exact tool for visualization and a numerical description of displacement fields.

Examples of these methods application for study of residual strength fields and displacement (deformation) fields near of a hole-concentrator in the sample are given.

Keywords: deformation, residual strength, optical methods, displacement fields, numerical analysis, correlation, digital image.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук [Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences] E-mail: Kfrolov@imash.ru

Введение

Исследование процесса деформации материала всегда являлось приоритетным направлением при изучении предельных состояний материала, поскольку именно деформация является первопричиной его разрушения [1–9]. Анализ напряженно-деформированного состояния необходим и широко используется для создания материалов нового поколения [10–13]. Экспериментаторы постоянно совершенствовали инструментарий для достоверных измерений деформационных параметров [14–16]. Метод накатанных сеток был наиболее простым, но при этом давал относительно грубую оценку параметров деформированного состояния. Решение вопроса в этом направлении несущественно продвинулось и с применением способа «наковки» узлов сетки путем микроиндентирова-

ния с наблюдением их (узлов) смещений в деформированном состоянии под микроскопом. Не вполне решала эту задачу и миниатюризация тензодатчиков. Наибольшая информативность в свое время была достигнута при использовании метода муаровых полос, но и здесь имело место заметное ограничение, обусловленное техническими возможностями создания высокоточных и высококачественных растров.

В настоящее время разработаны и активно используются бесконтактные оптические методы определения полей перемещений и деформаций на поверхности тел: корреляция цифровых изображений (КЦИ) [17–19] и электронная цифровая спекл-интерферометрия (ЭЦСИ) [16, 20–22]. Рассмотрим кратко их возможности и преимущества.

Материалы и методы

Метод КЦИ может быть реализован для анализа деформированного состояния объекта как в формате 2D, так и 3D. В частном варианте он может использоваться и в режиме виртуального оптического линейного тензомера. С его помощью производится отслеживание смещений одних и тех же физических точек (малых областей) на поверхности тела до и после его деформирования. С этой целью поверхность предварительно покрывается системой хаотически рассеянных микротян (например, мелкодисперсным распылением темной краски по светлomu фону), образующих так называемую спекл-структуру. Современные системы, основанные на применении высоко разрешающих цифровых видеокамер, и последующая математическая обработка кадров позволяют уверенно регистрировать и анализировать трансформацию спекл-структур, происходящую при статическом или динамическом нагружении объектов.

Записанные цифровые изображения обрабатывают с использованием методов корреляционного анализа случайных функций. Чтобы вычислить перемещение произвольной точки P , на цифровом изображении объекта, как правило, выделяют квадратную подобласть (ячейку) Σ размером $(2k+1) \cdot (2k+1)$ пикселей с центром в данной точке. Конкретное значение параметра k выбирают из такого условия, чтобы подобласть содержала достаточное для ее однозначной идентификации число элементов хаотичной спекл-структуры, как правило $k \approx 10$. В пределах выделенного фрагмента распределение интенсивности изображения описывается случайной функцией $F(\xi_i, \eta_j)$. При рассмотрении изображения с дискретностью в один пиксель координаты ξ_i и η_j приобретают целочисленные значения – от $-2k$ до $+2k$. На изображении деформированного объекта находят подобласть

Σ_d , внутри которой соответствующее пространственное распределение интенсивности $F_d(\xi_i, \eta_j)$ максимально подобно исходному распределению $F(\xi_i, \eta_j)$ – рис. 1. В первом приближении размер и форму соответствующих подобластей полагают одинаковыми. В качестве критерия подобия, как правило, выступает нормированный коэффициент кросс-корреляции:

$$C_N = \sum_{i=-k}^k \cdot \sum_{j=-k}^k \left[\frac{F(\xi_i, \eta_j) \cdot F_d(\xi_i, \eta_j)}{(\bar{F}) \cdot (\bar{F}_d)} \right], \quad (1)$$

где $\bar{F} = \sqrt{\sum_{i=-k}^k \cdot \sum_{j=-k}^k [F(\xi_i, \eta_j)]^2}$, $\bar{F}_d = \sqrt{\sum_{i=-k}^k \cdot \sum_{j=-k}^k [F_d(\xi_i, \eta_j)]^2}$

При этом $C_N=1$ в случае полной корреляции (тождества) функций F и F_d . Процедура поиска заключается в последовательных (от пикселя к пикселю) изменениях положения центра подобласти сравнения Σ_d в пределах некоторой зоны поиска Ω на трансформированном изображении по каждой из координат и в построении поверхности значений корреляционного критерия C_N (рис. 2). Координаты экстремума полученного распределения фактически определяют вектор перемещений (длину и направление) на поверхности объекта, усредненный в пределах данного элементарного «окна» (см. рис. 1).

Следуя данной процедуре, последовательно определяют все поле перемещений на исследуемом участке объекта, дискретизированное до габаритов ячейки Σ . В описанном варианте методики, перемещения вычисляют лишь с точностью до размера одного пикселя изображения. В современных системах применяют специальные подходы и алгоритмы для получения перемещений в субпиксельном диапазоне [17, 18]. Для достижения большей точности в корреляционных алгоритмах используют интерполяцию дискретных

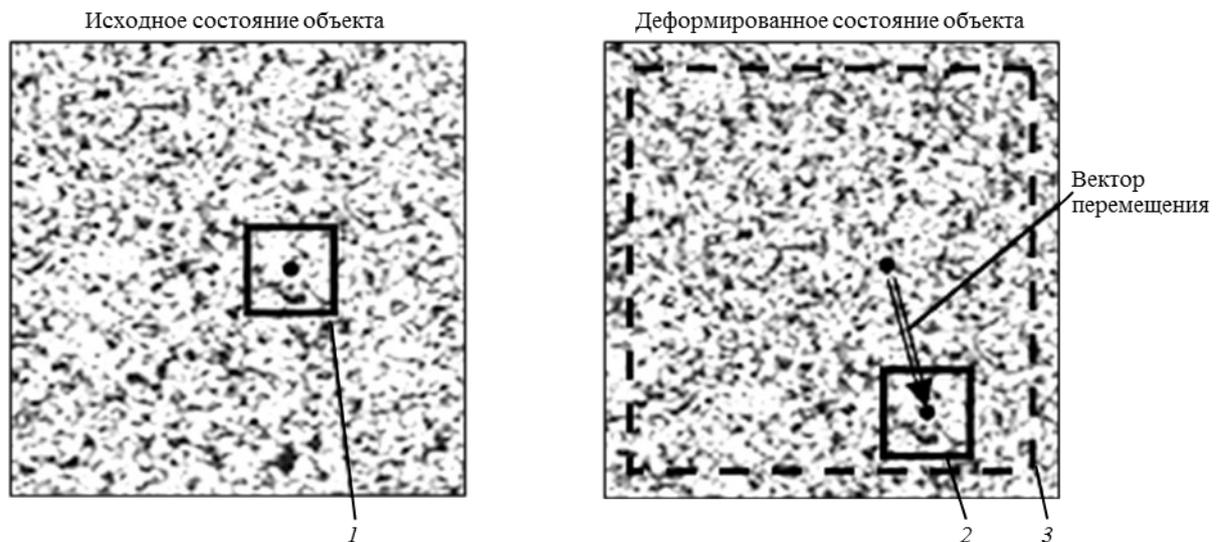


Рис. 1. Смещение спекл-структуры на объекте в процессе деформации: 1, 2 – подобласти Σ и Σ_d соответственно; 3 – зона поиска Ω

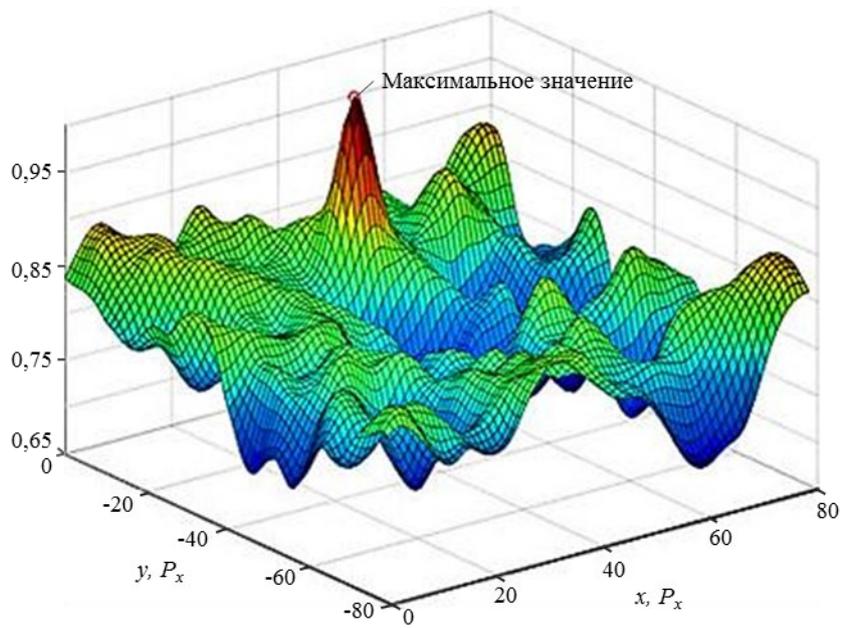


Рис. 2. Образование пика на распределении значений коэффициента корреляции

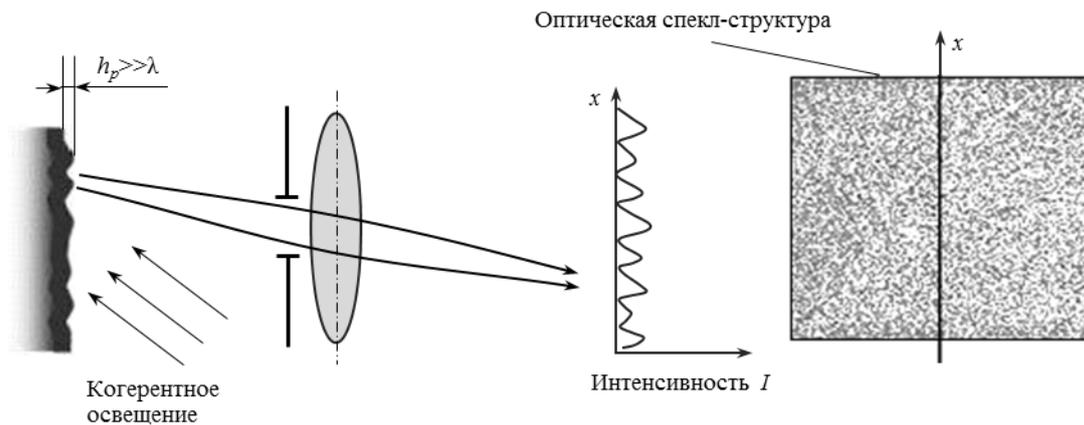


Рис. 3. Формирование естественной оптической спекл-структуры в плоскости изображений линзы

значений уровней интенсивности в виде непрерывной поверхности. Более точную информацию о перемещениях можно получить с применением интерполяционных функций высокого порядка. На заключительном этапе (при необходимости) методами численного анализа вычисляют частные производные от получаемых функций перемещений, что позволяет оценить величины компонент тензора деформаций.

Спекл-интерферометрия относится к классу когерентно-оптических методов экспериментальной механики и основана на специфическом оптическом эффекте. Известно [16, 23], что при диффузном отражении когерентного (лазерного) света от тела с шероховатой поверхностью пространственное распределение интенсивности I рассеянной световой волны обладает существенной микро неоднородностью. Как частный случай это явление наблюдается в плоскости изображений ка-

кой-либо системы линз с малой апертурой, в предметную плоскость которой помещен исследуемый объект (рис. 3). На микроуровне формируемое изображение будет состоять из хаотически расположенных пятен с размерами порядка десятков или единиц микрометров – оптических спеклов, формирующих естественную (а не искусственную, как ранее) спекл-структуру или спекл-поле. Для тел с оптически грубой поверхностью, для которой средняя высота рельефа (шероховатость) h_p существенно превышает длину волны λ используемого излучения, распределение по отдельным спеклам как значений интенсивности I , так и фаз световой волны имеет случайный характер. При смещениях тела исходная спекл-структура тем или иным образом трансформируется. Эти изменения положены в основу различных методов измерения полей перемещений.

В рассматриваемом варианте корреляционной

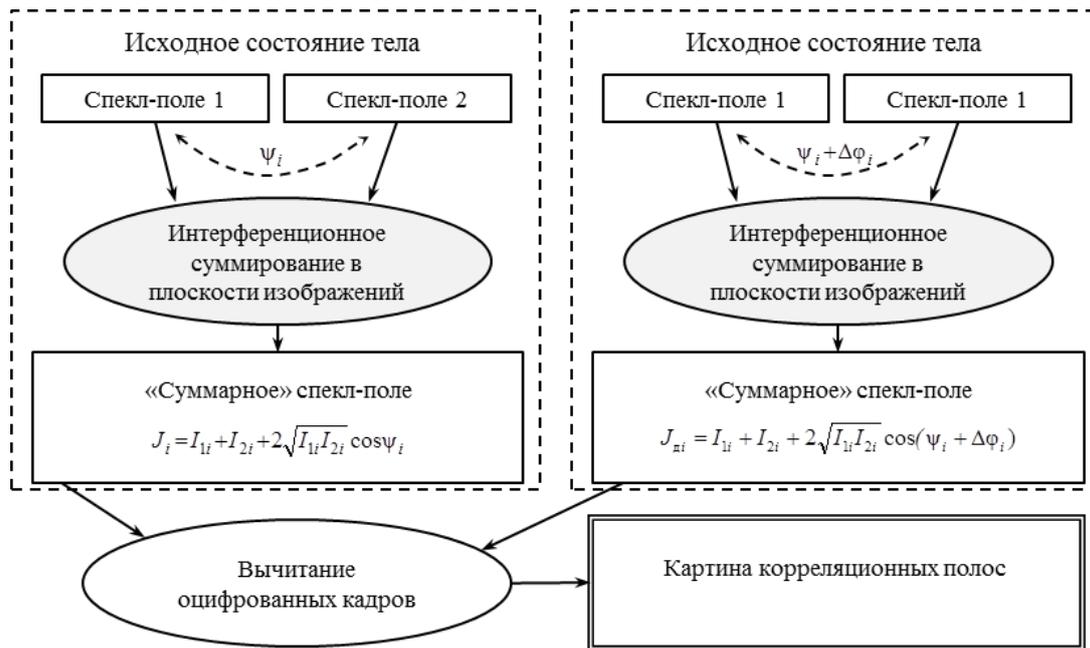


Рис. 4. Схема получения картин полос (спеклограмм)

ЭЦСИ первичная экспериментальная информация регистрируется в виде картин полос, представляющих собой изолинии полей отдельных компонент вектора перемещений. Процедура получения этих картин – спеклограмм – схематически поясняется на рис. 4. Первоначально в плоскости изображений одновременно создаются два независимых спекл-поля, при этом по крайней мере одно из них формируется световой волной, диффузно отраженной от исследуемого тела в исходном состоянии. (Одна из оптических схем, реализующих такое построение, демонстрируется далее.) Эти два поля суммируются с образованием новой (результатирующей) случайной спекл-структуры. Данное распределение дискретизируется по ячейкам ПЗС-матрицы (светочувствительного элемента цифровой видеокамеры), располагающейся в плоскости изображений объектива. Сигнал от ПЗС поступает в компьютер, оцифровывается и сохраняется в его памяти в виде числового файла, несущего информацию о микро неоднородности изображения объекта. Интенсивность некоторого i -го спекла в этой картине определяется соотношением:

$$J_i = I_{1i} + I_{2i} + 2\sqrt{I_{1i}I_{2i}} \cos \psi_i, \quad (2)$$

где I_{1i} и I_{2i} – локальные значения интенсивностей в исходных спекл-структурах (т. е. интенсивности интерферирующих спеклов); ψ_i – локальное значение разности фаз.

Данное выражение описывает случайную функцию, определенную на всем множестве спеклов. Принимаем, что все случайные величины I_{ki} и ψ_i независимы, а для средних значений интенсивностей в общем случае выполняется соотношение:

$$\langle I_2 \rangle = r \langle I_1 \rangle, \quad (3)$$

где r отражает их возможное расхождение (усреднение выполняется по всем спеклам).

Смещения точек поверхности объекта вносят те или иные дополнительные изменения в одну или обе исходные волны в зависимости от конкретной оптической схемы интерферометра. При этом изменениями интенсивностей I_{ki} допустимо пренебречь (из-за малости измеряемых перемещений), а принципиальное влияние на трансформацию результирующей спекл-структуры будут оказывать лишь возникающие дополнительные фазовые приращения $\Delta\phi_i$. Новая регистрируемая картина при этом будет описываться случайной функцией интенсивности:

$$J_{di} = I_{1i} + I_{2i} + 2\sqrt{I_{1i}I_{2i}} \cos(\psi_i + \Delta\phi_i) \quad (4)$$

Если приращения $\Delta\phi_i$ плавно растут, то интенсивности отдельных спеклов в наблюдаемом «суммарном» спекл-поле будут циклически изменяться. При этом, в силу случайной вариации начальных фаз ψ_i , эти изменения визуально проявляются в виде хаотического мерцания спеклов. Периодически также будут изменяться и параметры корреляции случайных распределений. Коэффициент корреляции функций (2) и (4), описывающих исходную и изменяющуюся спекл-структуры, определяется выражением:

$$\rho(\Delta\phi) = \frac{\langle J \cdot J_d \rangle - \langle J \rangle \cdot \langle J_d \rangle}{\sqrt{(\langle J^2 \rangle - \langle J \rangle^2)(\langle J_d^2 \rangle - \langle J_d \rangle^2)}} \quad (5)$$

Минимум коэффициента корреляции составляет $\rho_{\min} = (1-r)^2 / (1+r)^2$ и имеет место на подмно-

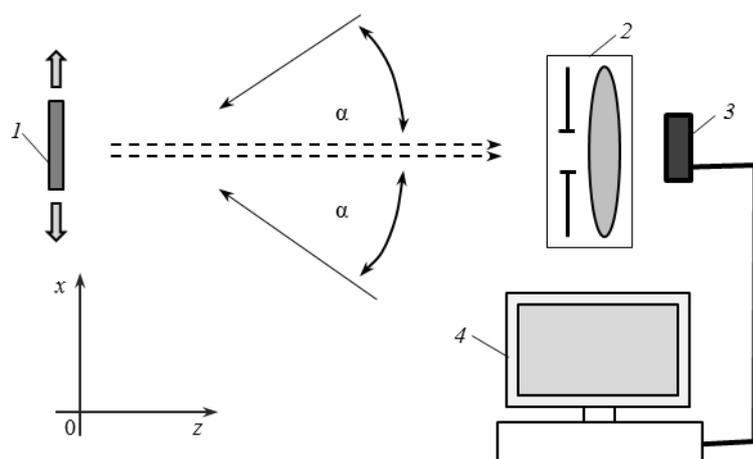


Рис. 5. Оптическая схема для измерения тангенциальных перемещений: 1 – объект исследования; 2 – объектив; 3 – ПЗС-матрица; 4 – ПЭВМ

жества точек, для которых выполнено условие $\Delta\varphi \cong \pi(2N+1)$, где N – целое число. Для множества точек (подобластей в плоскости изображения), где $\Delta\varphi \cong 2\pi N$, коэффициент корреляции стремится к максимуму ($\rho_{\max}=1$), т. е. функции J и J_d при этих условиях полностью скоррелированы.

При компьютерном воспроизведении разностных цифровых изображений, соответствующих двум произвольным состояниям объекта, на участках, для которых коэффициент корреляции достигает максимума, наблюдается их практически полное взаимное вычитание («гашение»). При непрерывности поля фазовых приращений $\Delta\varphi$ имеет место наличие темных зон – корреляционных полос на изображении поверхности тела, а значения N приобретают смысл порядков этих полос. Множества спеклов с минимальной корреляцией образуют условно светлые корреляционные полосы. Таким образом, наблюдаемое разностное изображение формируется в виде полос, несущих информацию о распределениях приращений фаз $\Delta\varphi$.

Изложенные выше общие соображения, касающиеся формирования и трансформации спеклструктур, справедливы лишь для случая идеального регистратора изображений с неограниченной разрешающей способностью. В реальных измерительных системах один элемент ПЗС-матрицы может записывать информацию об интегральной яркости элемента поверхности тела, хотя и малого (в пределах которого вариация величин $\Delta\varphi$ незначительна), но соответствующего нескольким спеклам. Данное обстоятельство приводит к снижению дисперсии случайного распределения интенсивности по ячейкам светочувствительной матрицы. Описанный выше эффект мерцания спеклов при плавном росте фазового приращения $\Delta\varphi$ на цифровом изображении, очевидно, будет выражен тем слабее, чем больше независимых спеклов попадает в габариты ячейки ПЗС-матрицы.

Основанием к применению корреляционной ЭЦСИ в экспериментальной механике является

функциональная взаимосвязь между приращением фаз $\Delta\varphi$ и значениями перемещений точек на поверхности тела. Для получения полного вектора перемещений \vec{d} должны быть зарегистрированы, как минимум, три спеклограммы в интерферометрах, обладающих выборочной чувствительностью к его пространственным компонентам. Наиболее удобным является представление результатов в виде спеклограмм, характеризующих поля нормальной к поверхности тела составляющей \vec{d} и соответственно двух тангенциальных. Во многих задачах достаточно регистрация только тангенциальных компонент u и v .

Для определения тангенциальных перемещений u используется интерферометр, в котором объект освещается одновременно двумя световыми пучками, симметричными относительно нормали – оси OZ (рис. 5). Возможность независимого измерения u и v предполагает совмещение в единой установке двух интерферометров данного типа, оси чувствительности которых развернуты на 90 град вокруг нормали. Расшифровка картин полос производится с использованием соотношений:

$$u = N_1 \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}; \quad v = N_2 \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}, \quad (6)$$

где N_i – порядки полос в заданной точке на соответствующих спеклограммах.

Одно из важных приложений ЭЦСИ в экспериментальной механике связано с исследованием остаточных напряжений. Среди разрушающих методов определения остаточных напряжений наибольшее распространение получил метод сверления отверстий-индикаторов [22, 24–26]. (Вместе с тем, имея в виду практику исследования остаточных напряжений, метод сверления отверстий часто называют полуразрушающим, так как просверленное в процессе исследований малое отверстие во многих случаях может не оказывать существенного влияния на прочность и несущую способность конструкции или после

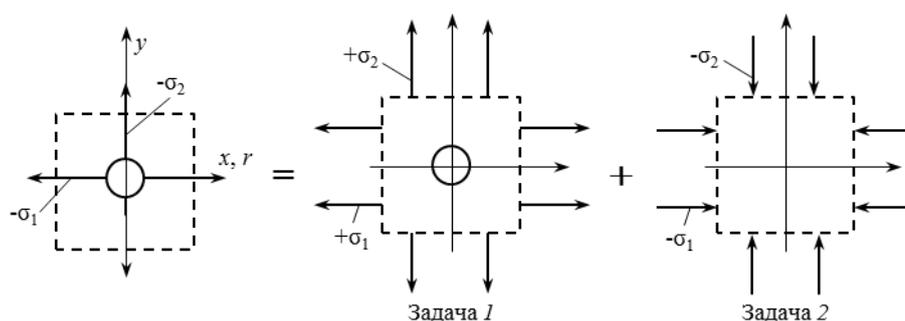


Рис. 6. Определение остаточных напряжений методом сверления отверстия

проведения измерений может быть заварено.) В этом случае значения компонент тензора напряжений рассчитываются по деформационному отклику материала, вызванному обнулением напряжений на образующихся свободных поверхностях.

Для детали, находящейся в условиях плоского напряженного состояния, при определении остаточных напряжений используют (аналитическое или численное) решение задачи теории упругости о напряженно-деформированном состоянии объекта с круговым отверстием. Для корректного применения указанного решения при интерпретации данных эксперимента необходимо, чтобы в круговой области с $r \leq (4+5)a$ (r – расстояние от центра отверстия; a – радиус отверстия) исследуемая деталь была геометрически и физически однородной, т. е. не имела неоднородных включений, отверстий и других концентраторов напряжений.

Формулы для расчета остаточных напряжений по данным измерений параметров напряженно-деформированного состояния, возникающего после сверления отверстия, могут быть получены следующим образом. Решение задачи об упругих напряжениях в теле неограниченных размеров с круговым отверстием, на контуре которого действуют напряжения σ_1 и σ_2 , можно представить в виде суммы двух систем напряжений (рис. 6):

– напряженного состояния тела с круговым отверстием, на удалении от которого действуют напряжения σ_1 и σ_2 (задача 1);

– двухосного однородного напряженного состояния тела без отверстия (задача 2).

Так как задачи 1 и 2 имеют замкнутые решения, можно установить связь между остаточными напряжениями, возникающими после сверления, и деформационным откликом в зоне отверстия.

Для того чтобы измерить вызванные сверлением деформации поверхности исследуемой детали (в зоне отверстия), применяют различные экспериментальные методы. Для регистрации деформационного отклика используют, например, розетки тензорезисторов. Хотя такой подход весьма распространен, он имеет существенные

недостатки, к которым можно отнести повышенное требование к соосности наносимого отверстия и заранее наклеенной тензорозетки. При несоблюдении этого требования неизбежна значительная погрешность в последующих расчетах остаточных напряжений, вызванная неадекватностью интерпретационной модели. Кроме того, с помощью трехэлементной розетки получают лишь минимальную информацию, необходимую для определения трех (в общем случае) неизвестных тангенциальных компонент остаточных напряжений. Имеет значение также и значительное время, затрачиваемое на подготовку к эксперименту.

С применением ЭЦСИ перечисленные недостатки устраняются. В частности, регистрация полей перемещений в окрестности отверстия-индикатора в виде картин полос позволяет получать деформационный отклик в значительном объеме, что ведет к повышению надежности результатов. В качестве иллюстрации на рис. 7 демонстрируются типичные картины, характеризующие перемещения u для некоторых соотношений напряжений: зарегистрированные при проведении экспериментов с применением ЭЦСИ и рассчитанные по теоретическим соотношениям. Сходство картин моделируемого и реального деформированного состояния позволяет судить в каждом конкретном случае о степени адекватности используемой интерпретационной модели.

Отметим, что при расшифровке спеклограмм в общем случае могут возникать сложности с идентификацией полосы нулевого порядка. При совершении ошибки значения N будут определяться с точностью до неизвестной постоянной. Данное обстоятельство, очевидно, не играет какой-либо заметной роли, если конечной целью эксперимента являются не сами значения перемещений, а некоторые величины, связанные с ними дифференциальными соотношениями. Исходя из этого порядки полос на расшифрованной спеклограмме заранее будут носить условный (относительный) характер. Другая особенность, характерная для всех когерентно-оптических методов измерения, состоит в том, что визуализируемые с их помощью картины полос непосредственно не содержат

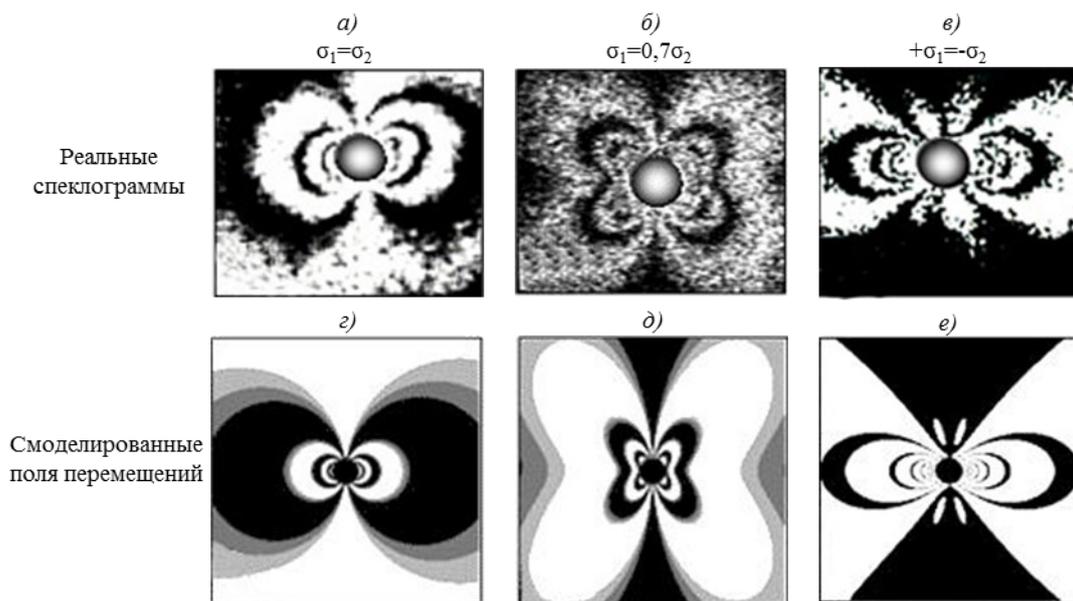


Рис. 7. Реальные и модельные спеклограммы поля перемещений u

информацию о знаке регистрируемых перемещений. Приведенные интерферограммы имели бы точно такой же вид и при смене направления нагрузок, но при сохранении их абсолютных величин. В общем случае для идентификации знаков требуется регистрация вспомогательных интерферограмм с дополнительно внесенным, контролируемым по знаку фазовым сдвигом.

Для оценки остаточных напряжений по данным экспериментально полученных деформационных полей могут быть использованы различные подходы, базирующиеся на интерпретации результатов измерений деформационного отклика, обусловленного как непосредственно сверлением отверстия в образце, так и рассверловкой имеющегося отверстия. Расчет значений напряжений основывается на численном сопоставлении экспериментальных значений перемещений, определяемых в точках с целочисленными значениями порядков полос, с данными моделирования соответствующей задачи. Расширенная интерпретация деформационного отклика в зоне отверстия в терминах остаточных напряжений должна опираться на ту или иную модель механического поведения тела. В рамках постановки задачи упругой деформации для обработки экспериментальных данных используются заранее устанавливаемые функции влияния, представляющие собой решение задачи о деформировании области, примыкающей к отверстию [26]. Как правило, при этом принимают однородность напряжений. Функции влияния $f(r, \theta)$ и $g(r, \theta)$ должны быть получены предварительно в аналитическом виде, исходя из геометрических и механических характеристик объекта, а также формы и размеров отверстия. В случае малых сквозных отверстий в тонкостенных элементах конструкций с этой целью используют реше-

ние в перемещениях задачи Кирша. Для глухих отверстий применяется моделирование упругих полей перемещений в окрестности высверленного отверстия в теле, содержащем остаточные напряжения, с помощью метода конечных элементов (МКЭ). При этом получаемые значения перемещений в узлах конечноэлементной сетки аппроксимируются подходящими непрерывными зависимостями. При проведении исследований по порядкам полос на интерферограммах находят величины $u_i(r_i, \theta_i)$ и $v_i(r_i, \theta_i)$ в нескольких точках, расположенных в окрестности отверстия. Для повышения точности результатов число точек измерений должно быть существенно больше числа искомых неизвестных. (Очевидно, что применение ЭЦСИ позволяет это сделать.) Далее сопоставляют систему разрешающих уравнений:

$$\begin{aligned} u_i &= \sigma_1 f(r_i, \theta_i) + \sigma_2 g(r_i, \frac{\pi}{2} - \theta_i) + u_0; \\ v_j &= \sigma_1 g(r_j, \theta_j) + \sigma_2 f(r_j, \frac{\pi}{2} - \theta_j) + v_0, \end{aligned} \quad (7)$$

где u_i и v_j – деформационный отклик в виде перемещений отдельных точек; r и θ – координаты точек, а константы u_0 и v_0 представляют собой дополнительные неизвестные, служащие для учета возможных смещений тела как жесткого целого относительно измерительной системы в процессе засверловки отверстия.

Введение данных параметров необходимо для адекватного описания деформационного отклика. Переопределенная система уравнений (7) решается методом наименьших квадратов. Помимо очевидного снижения влияния погрешностей измерений, это дает возможность оценивать адекватность принятой модели по степени устойчивости результатов вычислений путем вариации выборки

экспериментальных точек (как по их количеству, так и по расположению).

На практике оси чувствительности спеклинтерферометра могут не совпадать с осями главных напряжений. Если угол разориентировки систем направлений главных напряжений и осей чувствительности составляет φ_0 , то выражения, связывающие величины остаточных напряжений и тангенциальных перемещений, приобретут следующий вид:

$$u = \sigma_1 A_{11}(r, \varphi, \varphi_0) + \sigma_2 A_{12}(r, \varphi, \varphi_0) + u_0; \quad (8)$$

$$v = \sigma_1 A_{21}(r, \varphi, \varphi_0) + \sigma_2 A_{22}(r, \varphi, \varphi_0) + v_0,$$

где

$$A_{11} = f(r, \varphi - \varphi_0) \cos \varphi_0 - g(r, \varphi - \varphi_0) \sin \varphi_0;$$

$$A_{12} = g(r, \frac{\pi}{2} - \varphi + \varphi_0) \cos \varphi_0 - f(r, \frac{\pi}{2} - \varphi + \varphi_0) \sin \varphi_0;$$

$$A_{21} = f(r, \varphi - \varphi_0) \sin \varphi_0 + g(r, \varphi - \varphi_0) \cos \varphi_0;$$

$$A_{22} = g(r, \frac{\pi}{2} - \varphi + \varphi_0) \sin \varphi_0 + f(r, \frac{\pi}{2} - \varphi + \varphi_0) \cos \varphi_0;$$

$\varphi = \theta - \varphi_0$ – полярный угол, отсчитываемый от лабораторной оси OX .

Проведение исследований с использованием ЭЦСИ возможно на универсальном стационарном оптическом стенде. Основанием установки служит массивная стальная плита, покоящаяся на виброгасителях. На ее рабочей поверхности в узлах равномерной прямоугольной сетки нанесена система резьбовых отверстий, которые служат для жесткой фиксации основных элементов интерферометра, а также приспособлений для размещения и нагружения испытываемых образцов. К основным элементам интерферометра относят генератор непрерывного когерентного излучения – лазер, оптические преобразователи пучков, систему регистрации изображений (видеокамеру, сопряженную с компьютером). Оптические составляющие интерферометра – поворотные зеркала, расширители пучка, линзы, делительные пластины и пр. – помещаются в специальные оправки, которые фиксируются на стойках-держателях с возможностью точной юстировки собираемой оптической схемы. Общий вид типичного спеклинтерферометра, смонтированного на стационарной массивной плите, показан на рис. 8.

Для удобства проведения испытаний на стенде в ИМАШ РАН разработан и изготовлен отдельный измерительный модуль, в котором содержатся обе требуемые схемы для регистрации полей тангенциальных перемещений (рис. 9). Основанием указанного модуля является малогабаритная металлическая пластина-платформа, на которой смонтированы в виде объемной конструкции две группы направляющих зеркал, включая концевые зеркала 1 и 2, формирующие необходимые освещающие пучки. На вход измерительного модуля подается расширенный лазерный пучок, коллими-

рованный линзой 3, который может частично перекрываться одной из двух шторок 4 и 5. В зависимости от положения шторок в работу включается одна из схем для регистрации соответственно горизонтальной или вертикальной составляющей вектора перемещений точек объекта 6. Каждый из частных интерферометров построен по схеме с делением световых волн по фронту. Направляющие углы освещающих пучков для обеих схем равны 45 град. На стационарной оптической установке когерентное излучение генерируется твердотельным лазером DTL-317, создающим излучение мощностью 50 мВт с длиной волны $\lambda=0,532$ мкм, т. е. размер полосы на регистрируемых спеклограммах составляет 0,376 мкм.

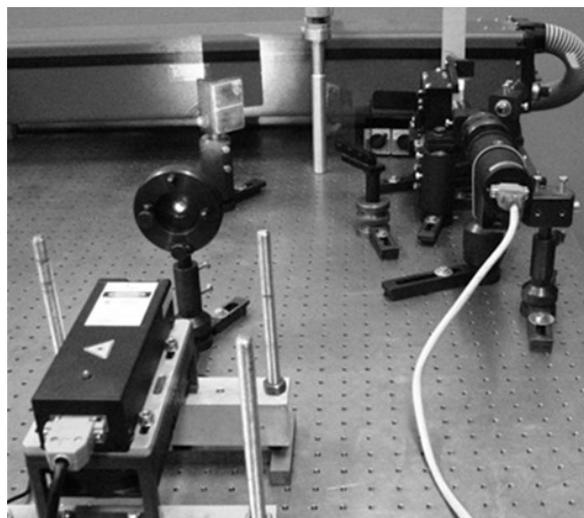


Рис. 8. Общий вид стационарной испытательной установки

Практическая ограниченность (в известной мере) рассмотренных выше методик исследования напряженно-деформированного состояния с применением ЭЦСИ состоит в возможности анализа деформаций объектов (образцов) лишь в условиях стационарного лабораторного стенда. Для исправления положения в ИМАШ РАН разработаны менее традиционные подходы и оборудование, использующие методологию ЭЦСИ для изучения деформационных процессов в материале при испытаниях образцов непосредственно на испытательной машине [27]. Работ такого рода в России до сих пор не проводилось. По крайней мере, авторам не известны сообщения о подобных решениях. Исследования базируются на использовании специального малогабаритного спеклинтерферометра, закрепляемого непосредственно на неподвижном захвате испытательной машины, что позволяет выполнять необходимые измерения прямо в процессе испытаний. Определяющим фактором эффективного функционирования созданного выносного спеклинтерферометра, оформленного в виде автономного оптико-

интерференционного прибора, является прежде всего его конструкционная жесткость. В его аппаратной части используются современные комплекты в основном отечественного производства. В частности, когерентное излучение генерируется малогабаритным твердотельным лазерным модулем марки LCM-S-111 (производство фирмы «Лазер-Компакт», Россия). Длина волны излучения составляет $\lambda=0,532$ мкм при мощности 20 мВт. Для регистрации изображений применяется видеокамера ВИДЕОСКАН-415-USB (производство фирмы «ВИДЕОСКАН», Россия) с разрешением 580×750 пикселей в сочетании с объективом AVENIR CCTV. Конструкция интерферометра допускает варьирование габарита поля наблюдения от 17×20 до 27×32 мм. Измерительная система позволяет независимо регистрировать спеклограммы полей перемещений в плоскости образца в направлении его продольной (вертикальной) и поперечной (горизонтальной) осей. Освещающие пучки каждой из схем не коллимируются и обладают некоторой кривизной, что в принципе приводит к непостоянству коэффициента чувствительности в пределах поля наблюдения. Однако конкретные геометрические параметры схемы обеспечивали его вариацию не более чем на 3–4%. Оптическая схема предусматривала возможность внесения в тракты пучков стеклянных плоскопараллельных пластинок с целью создания добавочного поля разности фаз (для определения знаков перемещений). Пример размещения интерферометра на испытательной машине INOVA представлен на рис. 10.

Для регистрации, хранения и обработки цифровых изображений используется компьютер типа ноутбук с применением параллельно двух различных программных средств. Во-первых, как и в случае испытаний на стационарной установке, задействуется стандартная управляющая программа, поставляемая фирмой-изготовителем видеокамеры. При этом накапливаемые в ходе испытания кадры записываются для каждой из двух частных оптических схем для измерения обеих тангенциальных компонент перемещений. В этом случае визуализация спеклограмм путем попарного вычитания зарегистрированных кадров, хранящихся в памяти компьютера, выполняется после окончания эксперимента с помощью программного комплекса Photoshop. С целью оперативного контроля развития деформаций и отслеживания возможных отклонений от номинального характера деформирования используется разработанная в ИМАШ РАН специализированная программа, позволяющая наблюдать возникающие картины полос в реальном режиме времени [28]. Контроль при этом производят по одной пространственной составляющей вектора перемещений u .

Результаты

Далее в качестве иллюстрации представлены

некоторые результаты, полученные при использовании метода КЦИ для визуализации реальных полей перемещений и деформаций при одноосном растяжении плоских образцов из алюминиевого сплава Д16-Т – сплошных и с концентратором напряжений в виде кругового отверстия. Эксперименты проводили на сервогидравлической испытательной машине INOVA (рис. 11). Для обработки цифровых изображений испытываемых образцов в данном случае задействовано стандартное программное обеспечение специализированной измерительной системы VIC (США) в формате 2D.

На рис. 12 демонстрируются картины полей продольных и поперечных перемещений в центральной области сплошного образца с поперечным сечением 38×4 мм. (Программа обработки цифровых изображений выдает подобные картины в полихроматическом представлении.) Как можно заметить, в данном случае экспериментально подтверждается «правильный» характер деформирования образца, в том числе отсутствие перекосов при нагружении. Значения приращений продольных перемещений на выбранной базе хорошо (в пределах допустимой ошибки) совпадали с показаниями электромеханического экстензометра, укрепленного на боковой стороне образца (см. рис. 12, а). Полученные данные позволили, в частности, построить зависимость коэффициента Пуассона (μ) материала от величины приложенной нагрузки (Q), наглядно иллюстрирующую изменение данного параметра в упругопластической области деформирования (рис. 13).

Очевидно, что возможность получения при эксперименте полных полей перемещений приобретает особое значение в случаях существенно неоднородного деформирования. Так, на рис. 14 представлены картины полей упругопластических перемещений и деформаций, полученные при испытаниях образцов с круговым концентратором напряжений ($\varnothing 6$ мм). Видно, что на реальных полях продольных и поперечных перемещений обнаружены вполне заметные искажения, вызванные, вероятно, неточностями изготовления или нагружения образца. Вместе с тем на распределениях деформаций в окрестности концентратора данный фактор менее выражен. (Некоторое отклонение от симметрии наблюдается на картине сдвиговых деформаций.)

Заметим, что определение численных значений исследуемых величин непосредственно на контуре выреза затруднено вследствие технических особенностей реализации метода КЦИ. Кроме того, метрологические характеристики данного метода не являются фиксированными и определяются такими параметрами, как габарит объекта, разрешающая способность видеосистемы, геометрические параметры элементов искусственной спекл-структуры, а также эффективностью алгоритмов обработки цифровых изображений. Так, при реализации описанных выше экспериментов

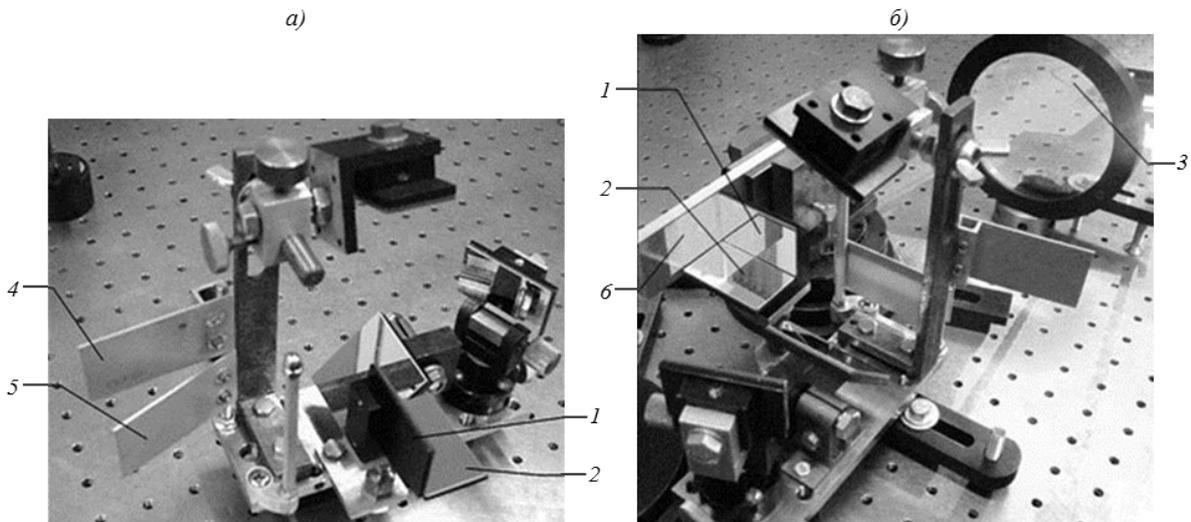


Рис. 9. Базовый модуль спекл-интерферометра для измерения двух тангенциальных компонент поля перемещений: 1, 2 – концевые зеркала; 3 – линза; 4, 5 – шторки; 6 – объект

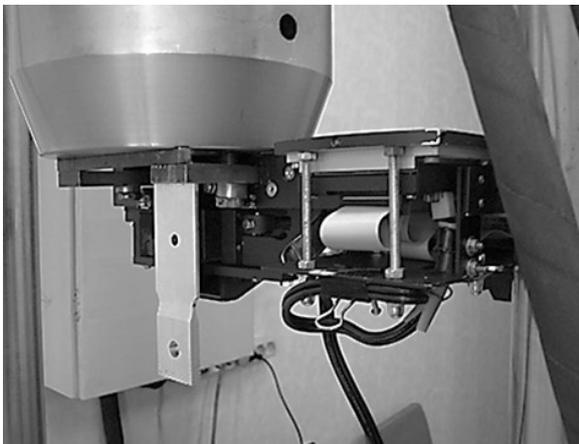


Рис. 10. Автономный выносной спекл-интерферометр, закрепленный на верхней траверсе разрывной испытательной машины INOVA

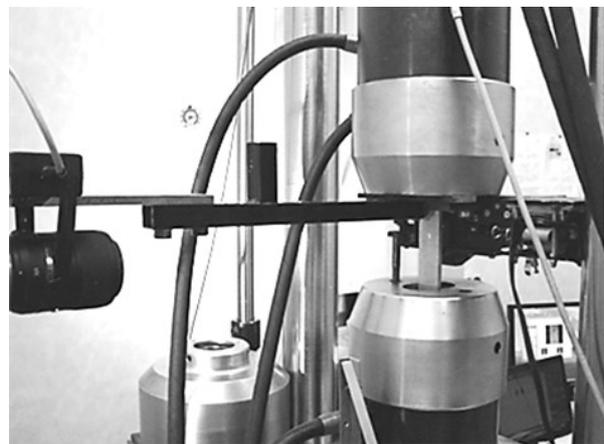


Рис. 11. Общий вид системы: видеокамера для регистрации изображений закреплена на кронштейне, присоединенном к неподвижному верхнему захвату

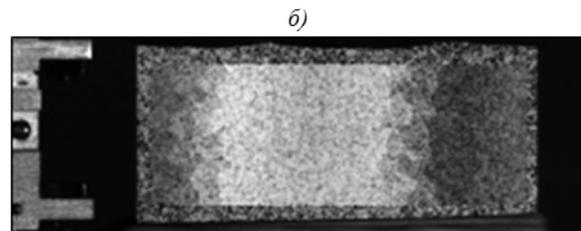
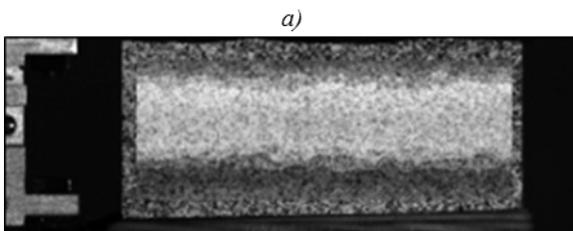


Рис. 12. Картины полей продольных (а) и поперечных (б) перемещений при одноосном растяжении сплошного образца

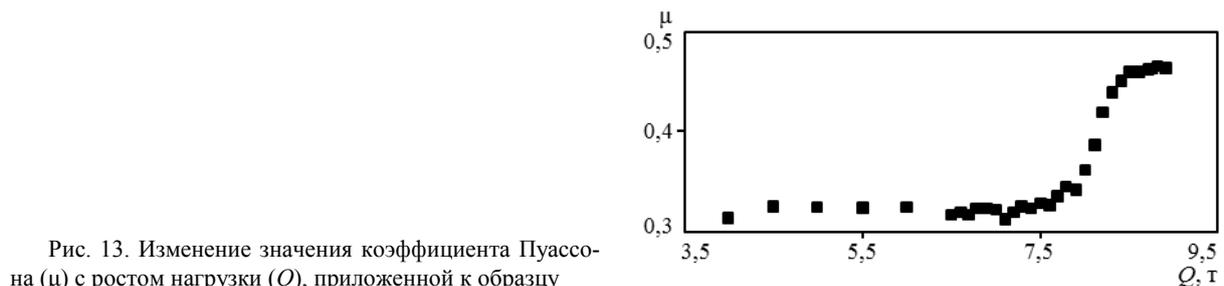


Рис. 13. Изменение значения коэффициента Пуассона (μ) с ростом нагрузки (Q), приложенной к образцу

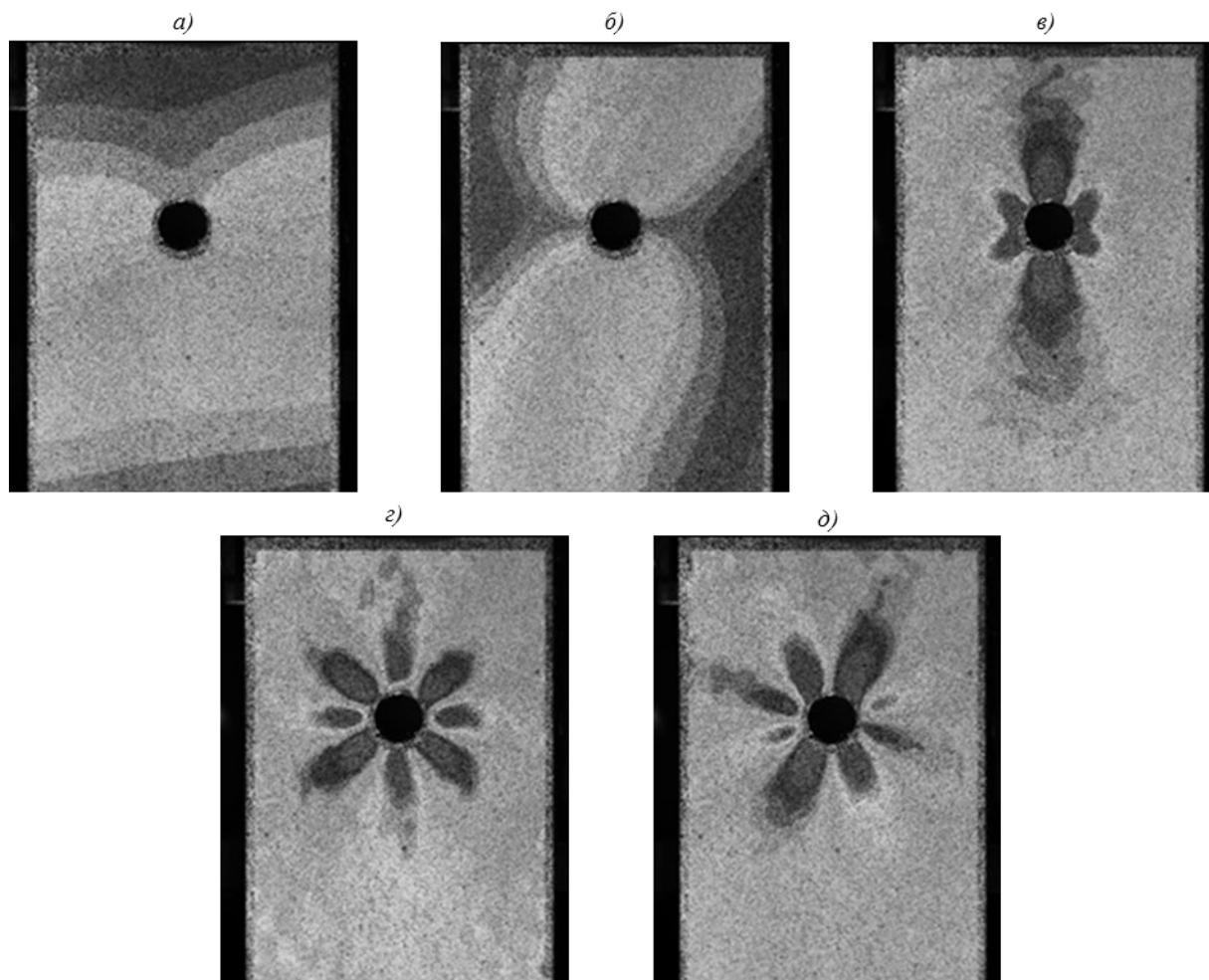


Рис. 14. Картины полей упругопластических перемещений и деформаций в плоском образце с концентратором напряжений:

a, б – продольные и поперечные перемещения; *в, г* – продольные и поперечные деформации; *д* – сдвиговые деформации

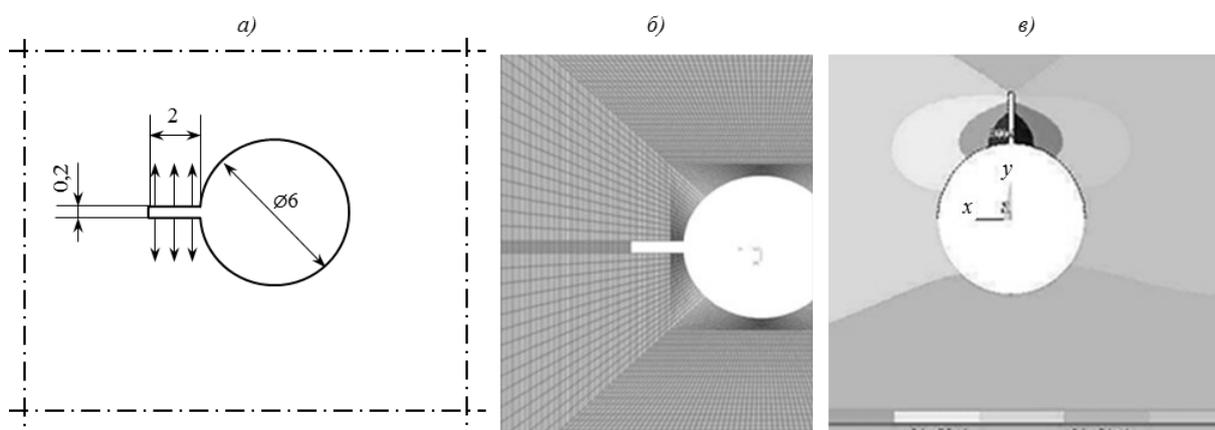


Рис. 15. Решение модельной задачи с помощью метода конечных элементов при наличии малого разреза – индикатора остаточных напряжений:

a – схема объекта; *б* – конечноэлементное разбиение; *в* – расчетное поле перемещений *u*

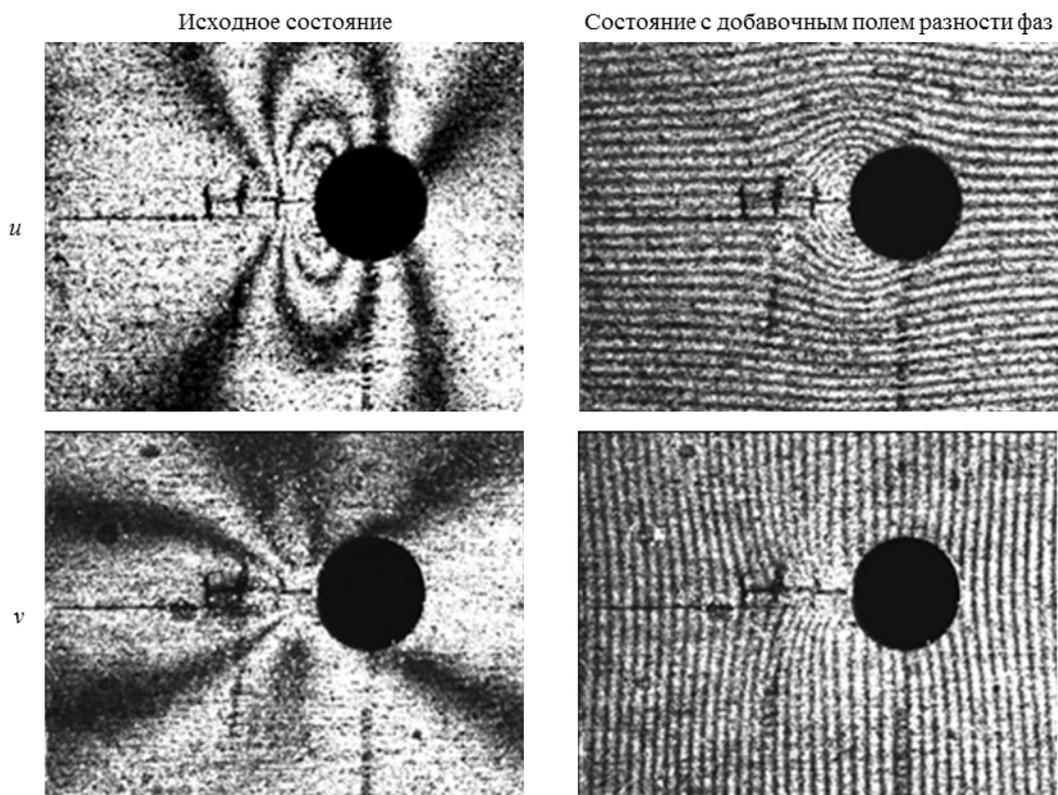


Рис. 16. Спеклограммы полей перемещений в окрестности пропила в образце из сплава 1469-Т после усталостной наработки при $\sigma=235$ МПа, $N=15000$ циклов (*u*, *v* – здесь и далее векторы перемещения в продольном и поперечном направлениях соответственно)

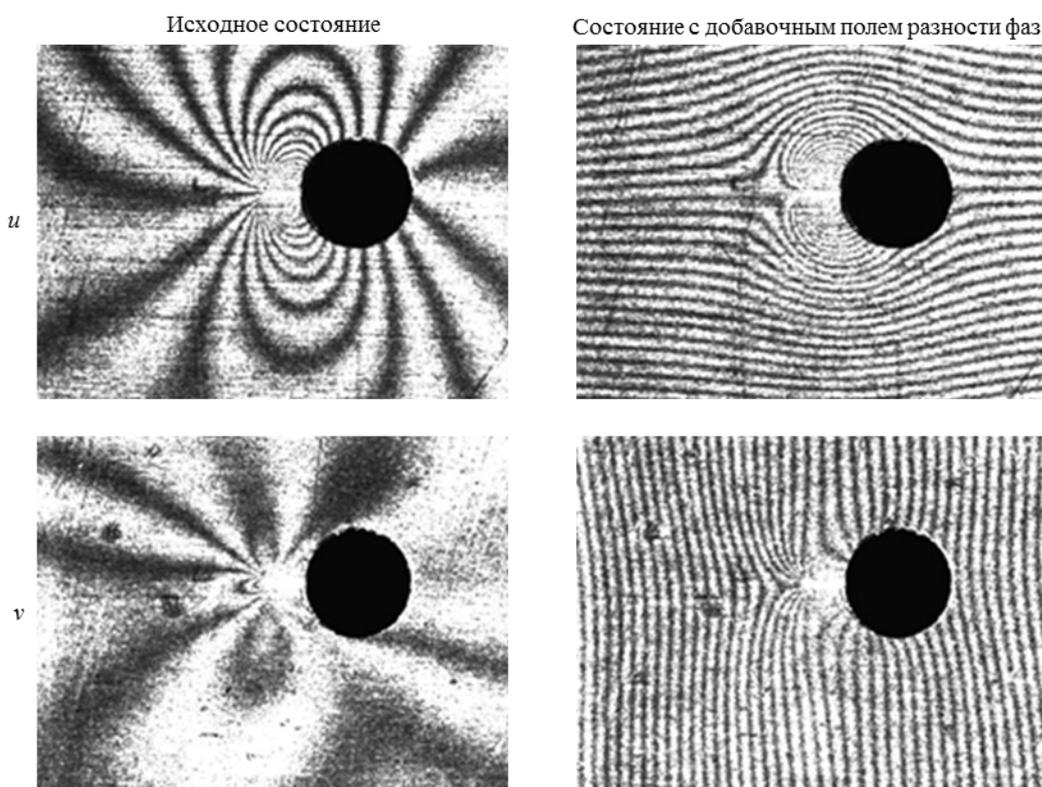


Рис. 17. Спеклограммы полей перемещений в окрестности пропила в образце из сплава 1163-АТВ после усталостной наработки при $\sigma=235$ МПа, $N=19330$ циклов

ошибку определения перемещений можно приблизительно оценить как $\sim 0,05$ мм. Для ряда задач такой уровень погрешности является вполне приемлемым. При необходимости в качестве значительно более точного инструмента для визуализации и численного описания полей перемещений используется метод ЭЦСИ.

Демонстрацией возможности метода ЭЦСИ может служить исследование остаточных напряжений в листовых полуфабрикатах из алюминиевых сплавов марок 1163-АТВ, В95п.ч.-Т2 и 1469-Т. Испытания проводили на образцах в виде полос сечением 36×200 мм, которые жестко крепились в захвате, фиксируемом с высокой степенью точности в ответной части специального возвратного кинематического приспособления, предназначенного для прецизионного позиционирования объекта в оптической схеме интерферометра после засверловки отверстия-индикатора на сверлильном станке. Установлено (как при первоначальном сверлении образца, так и при последующей рассверловке), что в образцах из сплава 1163-АТВ толщиной 1,5 мм и сплава В95п.ч.-Т2 толщиной 2,5 мм возможные остаточные напряжения находятся ниже порога чувствительности метода измерений (≤ 10 МПа). Данный вывод основан на анализе спеклограмм полей перемещений, на которых наблюдались лишь несформированные полосы с порядком >1 , т. е. перемещения были $>0,3$ мкм. Для листа из алюминиевого сплава марки 1469-Т толщиной 7 мм остаточные напряжения находились на уровне, не превышающем 40 МПа.

Для изучения динамики накопления остаточных напряжений в условиях действия переменных нагрузок в ходе циклических испытаний образцов с концентратором напряжений использовали несколько иную методику, согласно которой индикатором остаточных напряжений служит не высверливаемое отверстие, а радиальный разрез, идущий от контура концентратора. Такой подход позволяет получать лишь значения окружной компоненты напряжений, однако в данном случае он оказывается вполне оправданным, поскольку, как показали расчеты, в исследуемой зоне ее значения существенно выше, чем значения радиальной составляющей. Методом ЭЦСИ определяли разность перемещений в противоположных точ-

ках на берегах разреза, обусловленных снятием имеющихся в материале остаточных напряжений. Расчет значений напряжений, как и ранее, основывался на сопоставлении экспериментальных данных с результатами, полученными моделированием задачи в линейной постановке с помощью МКЭ. Нагрузки, действующие на берегах короткого разреза (т. е. снимаемые при разрезании остаточных напряжений и взятые с обратным знаком), при построении упрощенной (оценочной) модели принимали условно однородными (рис. 15). Геометрические параметры соответствовали имевшим место в реальном эксперименте.

Эксперименты выполняли с использованием той же, что и ранее ЭЦСИ-установки. На рис. 16 и 17 представлены спеклограммы полей тангенциальных перемещений в окрестности разреза (пропила) в образцах после их усталостной работы на испытательной машине. На фотографиях с добавленным линейным полем разности фаз полосы отклоняются от прорези, что в данном случае однозначно свидетельствует о смыкании ее берегов и, соответственно, о сжимающих остаточных напряжениях.

В результате математической обработки экспериментальных данных осуществлена оценка значений остаточных напряжений вблизи отверстия в исследованных образцах (см. таблицу). При анализе приведенных результатов следует учитывать, что интерпретация деформационного отклика в величинах остаточных напряжений может обоснованно выполняться лишь в приближении моделей упругого деформирования материала. В упругопластической постановке обратная задача механики вызывает не только значительные математические трудности, но и принципиальные ограничения. Вследствие этого в инженерных приложениях такой подход практически не используется. Вместе с тем игнорирование вклада пластической деформации при ее фактическом наличии приводит, очевидно, к получению неопределенно завышенных значений напряжений. Такие величины носят заведомо условный характер. Приведенные значения свидетельствуют о наличии в исследуемых образцах остаточных напряжений, сопоставимых с пределом текучести материала, а анализ напряженного состояния в данном случае осуществляется исключительно на сравнительном

Условно-упругие остаточные напряжения на контуре отверстия-концентратора после проведения этапа циклического нагружения образца

Сплав	Толщина образцов, мм	Условия циклических испытаний		Условно-упругие остаточные напряжения, МПа
		σ , МПа	число циклов нагружения N	
1469 ($E=78$ ГПа, $\mu^*=0,32$)	7	235	15000	-539
		235	26500	-611
		176	73290	-216
1163-Т ($E=70$ ГПа, $\mu^*=0,32$)	1,5	235	19330	-1186
		176	39000	-359
		176	19500	-288

* Коэффициент Пуассона.

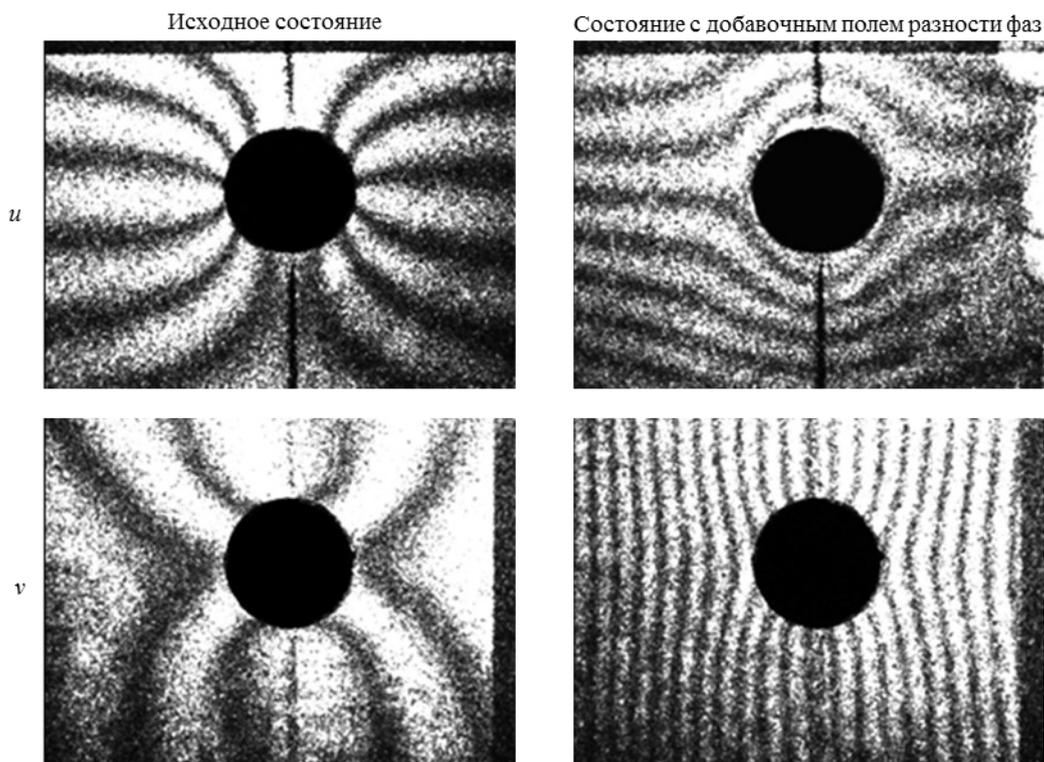


Рис. 18. Спекл-интерферограммы упругого деформирования образцов из алюминиевого сплава

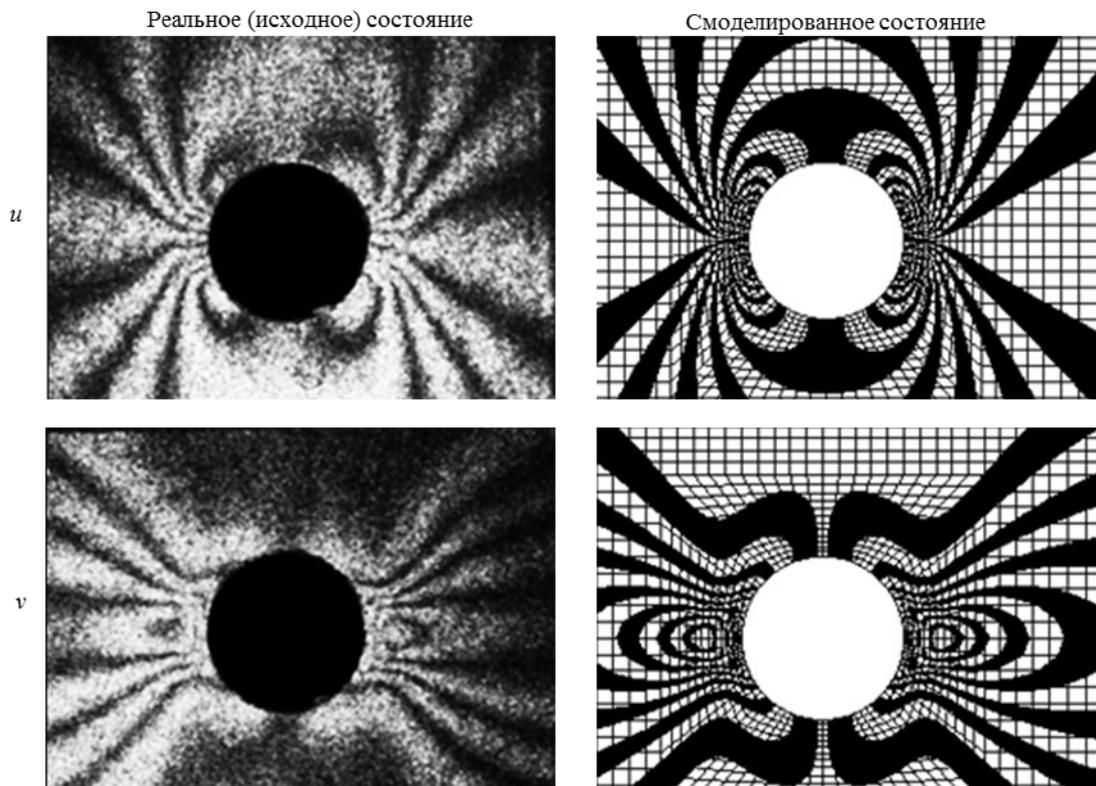


Рис. 19. Спеклограммы остаточного деформирования образцов из алюминиевого сплава

уровне. Разработка подходов к выполнению более детальных оценок (по метрической шкале) является предметом дальнейших методических исследований.

Исследование развития зон пластического деформирования при циклическом нагружении осуществляли на плоских образцах с центральным отверстием, изготовленных из листовых полуфабрикатов алюминиевых сплавов марок В95-Т2 и Д16-Т. В выполненной работе обоснование «правильного» характера закрепления и нагружения образцов опиралось на предварительный анализ спеклограмм упругого деформирования. Картины полос на рис. 18, характеризующие поля упругих перемещений, аналогичны решению задачи Кирша.

Перед началом циклических испытаний осуществляли несколько процедур при квазистатическом нагружении с увеличивающейся максимальной нагрузкой и разгрузкой до минимального уровня, после каждого нагружения регистрировали поля приращений остаточных перемещений. На заключительном этапе нагружения максимальная нагрузка соответствовала верхнему пределу, установленному для циклических испытаний. Одна из пар, зарегистрированных в эксперименте спеклограмм, представлена на рис. 19, на котором для сравнения приводятся картины изолиний остаточных перемещений, полученные МКЭ-моделированием рассматриваемой задачи с использованием условной двулучевой диаграммы деформирования. Видно, что данные фотографии на качественном уровне достаточно хорошо подтверждают экспериментальные результаты.

Следует отметить, что возможность изучения полей перемещений из-за высокой чувствительности ЭЦСИ требует исключения смещений образца как целого (точнее, его части в пределах зоны измерений) относительно оптической схемы интерферометра. Такие смещения приводят к эффекту так называемой необратимой декорреляции спекл-структур. При изучении поля остаточных перемещений (деформаций) в окрестности отверстия-концентратора в образце влияние данного фактора мало, поскольку пластическое деформирование материала оказывается сосредоточенным преимущественно в локальной области концентратора. Следовательно, жесткое смещение области наблюдения в центре образца как интегральная величина от функции перемещений по его длине от захвата до границ данной области будет незначительным. Отметим, что в случае упругого деформирования фактор жесткого смещения оказывает заметное ограничительное влияние, что требует разработки особых приемов регистрации и визуализации спеклограмм.

Циклические испытания осуществляли с частотой 1÷5 Гц при коэффициенте асимметрии нагружения $R=0,1$. После заданного числа циклов производили запись спеклограмм приращений

остаточных перемещений, характеризующих приращение пластических деформаций в зоне концентрации напряжений. В качестве иллюстрации на рис. 20 демонстрируются типичные картины, отвечающие как последовательному, равномерно приращению остаточных деформаций, так и моментам зарождения и первоначального распространения трещин.

Для вычисления величины остаточной деформации в точке концентрации напряжений (на контуре отверстия) использовали математическую обработку спеклограмм, полученных при квазистатическом и циклическом нагружении. Дискретное экспериментальное распределение контурных перемещений $u(\varphi_i)$ (где φ_i – окружные координаты точек выхода полос на контур отверстия) аппроксимировали по методу наименьших квадратов непрерывной зависимостью в виде тригонометрического полинома:

$$[u(\varphi)]_{\text{контур}} = A_1 + A_2 \cos(\varphi) + A_3 \cos^3(\varphi) + A_4 \cos^5(\varphi). \quad (9)$$

Углы φ_i отсчитывали от продольной оси образца OX . При этом выбор четной аппроксимирующей функции ведет к игнорированию возможных малых искажений симметрии поля остаточных деформаций. Значения деформации в точках концентрации определяли значением производной функции (9) при $\varphi = \pm\pi/2$:

$$(\varepsilon_x)_{\text{ост}} = \frac{1}{R_0} \left. \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right|_{\varphi = \pm\pi/2}, \quad (10)$$

где R_0 – радиус отверстия-концентратора.

Расчеты выполняли лишь для регулярных распределений перемещений на контуре, т. е. до образования усталостной трещины. В отдельных случаях, когда появлялась односторонняя трещина, выполняли оценку деформации в точке концентрации с противоположной стороны.

Проведенные вычисления позволили установить динамику нарастания остаточной деформации в зависимости от наработки. В плоском образце с центральным отверстием ($K_t=2,6$) из сплава Д16-Т при $\sigma_{\text{нетто}}=233$ МПа получены следующие величины остаточной деформации для различных наработок: $10,9 \cdot 10^{-4}$ – после 1 цикла; $14,3 \cdot 10^{-4}$ – после 3000 циклов; $15,9 \cdot 10^{-4}$ – после 6000 циклов; $21,9 \cdot 10^{-4}$ – после 7000 циклов. Для сплава В95-Т1 получены существенно меньшие величины остаточной деформации: $3,6 \cdot 10^{-4}$ – после 1 цикла; $4,8 \cdot 10^{-4}$ – после 6000 циклов. Выполненная оценка уровня остаточной деформации показала, что для образцов из сплава Д16-Т началу образования усталостного разрушения отвечает ее значение $\sim(20 \div 25) \cdot 10^{-4}$. На рис. 21 приводятся фотографии перемещений при развитых усталостных трещинах на завершающем этапе испытаний.

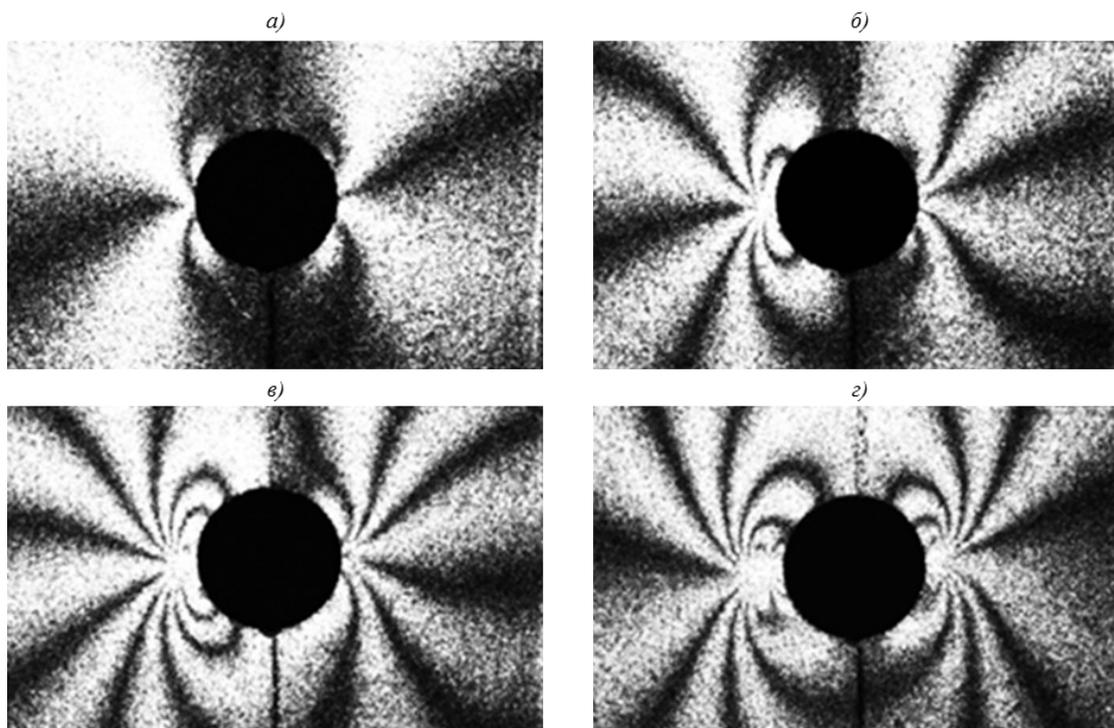


Рис. 20. Спеклограммы полей продольных остаточных перемещений u , характеризующих накопление пластических деформаций в образце сплава Д16-Т при циклическом нагружении после 3000 (а); 6000 (б – появление усталостной трещины слева от отверстия-концентратора); 7000 (в) и 8200 циклов (г – появление второй усталостной трещины справа от отверстия-концентратора)

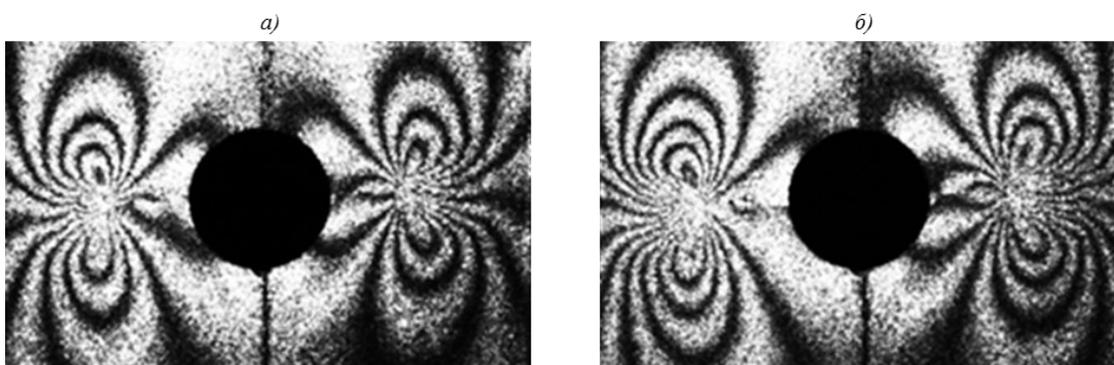


Рис. 21. Спеклограммы полей приращений продольных остаточных перемещений u , характеризующих ускоренное развитие усталостных трещин в образце сплава Д16-Т после 11050 (а) и 11130 циклов (б)

Обсуждение и заключения

Анализ современных оптических методов (корреляции цифровых изображений и корреляционной электронной цифровой спеклинтерферометрии) и полученные на их основе результаты позволяют сделать вывод о высокой эффективности подходов экспериментальной механики, предоставляющих сведения о деформированном состоянии объектов не в отдельных точках, а в континуальном формате. Их использование открывает новые возможности для изучения процессов деформации и разрушения твердых тел благодаря значительной по объему и качеству

исходной информации, получаемой экспериментатором. Активному внедрению данного инструментария в инженерную практику будут способствовать совершенствование по существу и упрощение по процедуре использования его как аппаратной, так и программной составляющих. Перспективным представляется также сочетание методов КЦИ и ЭЦСИ в едином измерительном комплексе, что существенно расширит диапазон исследуемых полей перемещений и деформаций.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №14-08-00531А и №13-08-97177.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ измерения деформации конструкции из композиционного материала: пат. 2427795 Рос. Федерация; опубл. 03.12.2009.
2. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Почивалов Ю.И., Панин С.В., Колобнев Н.И. Влияние наноструктурирования поверхностного слоя алюминий-литиевого сплава 1424 на механизмы деформации, технологические характеристики и усталостную долговечность, повышение пластичности и технологических характеристик //Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. №6. С. 107–111.
3. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 06 (viam-works.ru).
4. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
5. Гуляев А.И. Исследование полимерных материалов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии //Труды ВИАМ. 2013. №7. Ст. 04 (viam-works.ru).
6. Колобнев Н.И., Махсидов В.В., Самохвалов С.В. и др. Влияние деформации после закалки и режимов старения на механические и коррозионные свойства сплава системы Al–Mg–Si–Cu–Zn //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 12–15.
7. Разуваев Е.И., Лебедев Д.Ю., Бубнов М.В. Формирование ультрамелкозернистой и наноразмерной структуры в металлах и сплавах методами деформации //Авиационные материалы и технологии. 2010. №3. С. 3–8.
8. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России. //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
9. Симоненко Е.П., Симоненко Н.П., Севастьянов В.Г., Гращенков Д.В., Кузнецов Н.Т., Каблов Е.Н. Функционально градиентный композиционный материал SiC/(ZrO₂–HfO₂–Y₂O₃), полученный с применением золь-гель метода //Композиты и наноструктуры. 2011. Т. 4. С. 52–64.
10. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 06 (viam-works.ru).
11. Ильичев А.В., Раскутин А.Е. Исследование влияния концентратора напряжений на напряженно-деформационное состояние углепластика методом корреляции цифровых изображений //Авиационные материалы и технологии. 2014. №3. С. 62–66.
12. Тренингов И.А., Алексеев А.А., Поляков С.Н. Методика определения остаточных напряжений в монокристаллах жаропрочных никелевых сплавов на дифрактометре широкого назначения с использованием Cu K_β-излучения //Авиационные материалы и технологии. 2010. №1. С. 8–12.
13. Смирнов А.А., Будиновский С.А. Анализ эволюции нормальных напряжений в системе «сплав–покрытие» в области температур до 1200°C //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 8–14.
14. Экспериментальная механика: Пер. с англ. /Под ред. А. Кобаяси. М.: Мир. 1990. Т. 1, 2.
15. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. М.: Машиностроение. 1983. 248 с.
16. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир. 1986. 328 с.
17. Sutton M.A., Orteu J., Schreier H.W. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications. Springer. 2009. 321 p.
18. Pan B., Qian K., Xie Y., Asundi A. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review //Measurement Science and Technology. 2009. V. 20. P. 1–17.
19. Усов С.М., Одинцев И.Н. Применение метода корреляции цифровых изображений для исследования процесса деформирования и разрушения материалов и элементов конструкций /В сб. трудов Международной конф. «Живучесть и конструкционное материаловедение». М.: ИМАШ РАН. 2012. Т. 1. С. 304–313.
20. Gloud G.L. Optical methods in engineering analysis. Cambridge: University Press. 1998. 503 p.
21. Rastogi P. Digital speckle pattern interferometry and related techniques. Wiley, West Sussex. 2001.
22. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М.: Изд. МГТУ. 2007. 240 с.
23. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир. 1980. 171 с.
24. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз. 1963. 233 с.
25. Махутов Н.А., Разумовский И.А., Косов В.С., Апальков А.А., Одинцев И.Н. Исследования остаточных напряжений с применением электронной цифровой спекл-интерферометрии в натуральных условиях //Заводская лаборатория (Диагностика материалов). 2008. Т. 74. №5. С. 47–51.
26. Апальков А.А., Одинцев И.Н., Разумовский И.А. Интерпретация картин полос при измерении остаточных напряжений с использованием электронной спекл-интерферометрии //Заводская лаборатория. 2002. Т. 68. №5. С. 39–41.
27. Гриневиц А.В., Одинцев И.Н., Северов П.Б. Применение цифровой спекл-интерферометрии при испытаниях материалов на усталость //В сб. трудов Международной науч.-технич. конф. «Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций». Киев. 2013. С. 84–85.
28. Махутов Н.А., Одинцев И.Н., Разумовский И.А., Ручкин В.В., Чернятин А.С. Математическое и программное обеспечение метода ЭЦСИ для решения задач механики деформируемого твердого тела /В сб. материалов Международной науч.-технич. конф. «Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы». Таганрог: Изд-во. ТТИ ЮФУ. 2009. Т. 1. С. 202–208.