

УДК 62-22+531.7:535.417

И. Н. Одинцев, кандидат технических наук,
Институт машиноведения РАН, Россия, Москва
Тел.: +8 (499)135-77-51; E-mail: ino54@mail.ru.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НАГРУЖЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПО ДАННЫМ О ПОЛЯХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

В статье рассматривается расчетно-экспериментальный подход к уточнению параметров нагрузок, действующих на элемент конструкции, а также фактических граничных условий и жесткостных свойств, исходя из информации о полях перемещений, получаемой средствами интерференционно-оптических измерений. В ряде случаев для решения подобной обратной задачи эффективным оказывается упрощенный метод, использующий понятие формализованного отклика. Его применение демонстрируется на примере исследования тестового объекта в виде пластины при изгибе.

Ключевые слова: параметры нагрузки, граничные условия, обратная задача, деформационный отклик, поля перемещений, оптико-интерференционные методы.

I. N. Odintsev

IDENTIFICATION OF REAL LOADING CONDITIONS FOR STRUCTURAL ELEMENTS ON THE BASIS OF DISPLACEMENT FIELDS DATA

The article discusses a computational and experimental approach to clarifying the parameters of loads acting on a structural element, as well as the actual boundary conditions and stiffness properties, based on information about the displacement fields obtained by means of interference-optical measurements. In a number of cases, to solve such an inverse problem, a simplified method using the concept of a formalized response turns out to be effective. Its application is demonstrated by the example of the study of a test object in the form of a plate under bending.

Keywords: load parameters, boundary conditions, inverse problem, deformation response, displacement fields, optical interference methods.

1. Введение

При эксплуатации различного рода технических объектов фактические параметры нагруженности их деталей и конструктивных составляющих нередко оказываются в той или иной мере отличными от расчетных. Очевидно, это может быть связано с проявлением таких факторов как неточности изготовления, погрешности сборки, конструктивные ошибки, неоптимальность режимов работы и пр. Кроме того, в отдельных случаях в функционирующем объекте могут возникать скрытые паразитные механические связи между элементами, сам факт появления которых и их возможные жесткостные характеристики сложно предсказать заранее. Заметим, что потенциальные аномалии в нагрузках на элемент и в граничных условиях для него при надлежащем общем проектировании системы, как правило, являются не столь существенными – лежащими в пределах установленных допусков. Однако в проблемных случаях они все же могут стать причиной возникновения нежелательных явлений, например, заклинивания движущихся частей механизмов или их преждевременного износа. Это определяет потребность в дополнительном обосновании надежности работы конкретных деталей и узлов с учетом реальных особенностей эксплуатации конструкции. В значительной мере это касается объектов прецизионного машиностроения и приборостроения.

Восстановление условий нагруженности элемента конструкции может осуществляться путем анализа его деформированного состояния, обусловленного внешними воздействиями. При этом геометрия тела и механические свойства материала полагаются заранее заданными.

Как известно, процедуры подобного рода представляют собой так называемые обратные задачи механики [1, 2]. При постановке в общем виде они являются некорректными, и их решение может не обладать свойствами единственности и устойчивости. Напомним, что для устранения подобных недостатков разработан специальный метод регуляризации [3]. Существенное значение здесь имеет всесторонний учет предполагаемых свойств функций деформационного отклика объекта на нагружение (ограниченность, монотонность, степень гладкости и пр.). Отметим, что сам отклик при использовании различных средств его регистрации может иметь разное конкретное представление – в виде значений отдельных компонент тензора деформаций или вектора перемещений. При этом важную роль играет объем получаемой экспериментальной информации, а также уровень и характер погрешностей измерений.

В работе [4] описана методика (и программная реализация) решения обратных задач механики деформируемого твердого тела, основанная на моделировании возможного вида деформационного отклика тела практически произвольной формы с использованием метода конечных элементов. Реализуемый итерационный процесс поиска решения заключается в целенаправленном изменении интересующих неизвестных характеристик объекта (стартуя с некоторого начального приближения) и в сопоставлении расчетного и экспериментального распределений, характеризующих его деформированное состояние. Процесс полагается завершенным, когда их отличие по какому-либо принятому критерию (например, сумме квадратов отклонений значений на заданной сетке координат) оказывается меньшим наперед заданного допуска. (Заметим, что интересующими характеристиками здесь могут быть не только внешние нагрузки, но и другие величины: остаточные напряжения, параметры механики разрушения, механические свойства материала и пр.) В ряде случаев для достижения поставленной цели зачастую удается применять упрощенный подход, который может быть охарактеризован как метод формализованного отклика. Ниже формулируются его основные положения.

Как подчеркивалось ранее, важным условием успешного решения рассматриваемых обратных задач является наличие значительного объема исходных данных. В арсенале средств экспериментальной механики особое место занимают лазерные интерференционно-оптические методы – голографическая интерферометрия и спеклинтерферометрия [5-8], позволяющие получать информацию о перемещениях на поверхности деформируемого тела не в отдельных точках, а непосредственно в полевом формате. Измерения с их помощью выполняются бесконтактно и с высокой точностью, а недостатком является лишь необходимость визуальной доступности объекта. Заметим, что в последнее время популярность среди экспериментаторов набирает родственный по целям и возможностям метод корреляции цифровых изображений [7-9]. Он обладает более высоким порогом чувствительности измерений, но является сравнительно более простым в плане технической реализации.

В настоящей работе демонстрируется применение метода формализованного отклика в сочетании с голографической интерферометрией на примере восстановления условий нагруженности тестового объекта – изгибаемой пластины. Хотя полученные здесь результаты носят, по существу, иллюстративный характер, однако известно, что тела подобного вида достаточно широко используются на практике как элементы различных конструкций.

2. Метод формализованного отклика

Рассматриваемую задачу в общей постановке можно сформулировать следующим образом. Пусть какой-либо реальный механический (физический) объект, форма-

лизуемый в рамках принятой априори математической модели с множеством $G: \{g_i\}$ внутренних характеристик, подвергается внешнему воздействию, определяемому множеством факторов $P: \{p_i\}$. В результате возникает деформационный (объектный) отклик R , подмножество которого $\tilde{R} \subset R$ регистрируется¹. В принципе, цель выполняемого эксперимента может состоять лишь в проверке общих гипотез модели (например, о регулярности, линейности или обратимости² отклика). Однако чаще всего речь идет о решении обратной задачи для определения совокупности характеристик $\{p_i\}$ или $\{g_i\}$, то есть о восстановлении в рамках данной модели либо силовых, тепловых или других внешних воздействий (оценка параметров p_i), либо характеристик конструкционной жесткости (оценка g_i). Достаточно простой и во многих случаях эффективный подход к решению подобных задач базируется, по существу, на их доскональной априорной конкретизации: исходя из обоснованных представлений, общая модель реального физического явления, по возможности, редуцируется к предельно упрощенной схеме, сохраняющей лишь наиболее представительные, существенные факторы. При этом функциональное содержание принимаемой схематизации таково, что состояние системы «объект – внешнее воздействие» полностью определяется точками в пространстве (достаточно малой размерности n) числовых параметров $C_i, i = 1, \dots, n$ – параметров редуцированной модели. Если решением прямой задачи в такой постановке может быть получено общее аналитическое выражение $\tilde{R}^*(C_i)$ для ожидаемого отклика, то параметры, отвечающие его реализации \tilde{R} в частном случае, рассчитываются из условия минимизации невязки:

$$\|\tilde{R}^*(C_i) - \tilde{R}\| \rightarrow \min \quad (1)$$

Естественно, получаемое таким способом решение относительно характеристик системы не может выйти за рамки принимаемой заранее упрощенной схемы. Вклад в \tilde{R} от любого непредвиденного или не введенного в рассмотрение, но реально существующего фактора будет, в соответствии с (1), распределяться между вкладами от факторов, присутствующих в редуцированной модели, то есть, в общем случае, будет вносить в них неопределенные погрешности – погрешности модели (в отличие от ошибок, собственно, измерений и вычислений). С другой стороны, именно строгая регламентация допускаемого – формализованного – вида отклика $\tilde{R}^*(C_i)$, принадлежащего заданному функциональному классу, собственно говоря, и определяет эффективность решения поставленной задачи. Кроме того, при избыточности экспериментальных данных имеется возможность статистической оценки адекватности принятой схемы, расширения (или сужения) множества ее параметров C_i [10]. Отметим, что в ряде практических случаев даже при достоверности выхода реального поведения объекта за границы принятой схемы описание регистрируемого отклика все же осуществляется в ее рамках (то есть в заданном классе функций и пространстве параметров C_i). В подобных ситуациях получаемые оценки носят заведомо условный характер. Рассмотренный метод интерпретации экспериментальной информации будем характеризовать как «метод формализованного отклика». (В целом аналогичный подход к проблеме, формулируемой в тер-

¹ Подмножество \tilde{R} образуют лишь характеристики деформированного состояния тела, непосредственно измеряемые в эксперименте.

² Под обратимостью здесь понимается полный возврат отклика к исходным (нулевым) значениям при снятии внешнего воздействия. Если речь идет о механическом состоянии, то это подразумевает отсутствие пластических деформаций в теле.

минах решений интегральных уравнений, определяется в [3], как метод подбора.)

При использовании интерференционно-оптических средств измерения или метода корреляции цифровых изображений регистрируемые деформационные отклики конкретизируются в виде полных картин распределений отдельных компонент вектора перемещений, определенных на визуально доступной части поверхности тела, то есть отклик \tilde{R} здесь приобретает смысл квази-континуальных полей соответствующих величин.

Выше говорилось о том, что выражение для формализованного отклика изначально получают в аналитическом виде. Конечно, это представляется возможным лишь для сравнительно небольшого круга объектов достаточно простой формы и несложных по типу внешних воздействий. В такой постановке область применения метода оказывается сравнительно узкой. Разумная альтернатива для исследования произвольных тел состоит в использовании частных откликов $\tilde{R}_j^*(C_i), j = 1, \dots, m_i$, рассчитанных заранее помощью методов численного анализа, например метода конечных элементов, при изменении параметров модели C_i в установленных пределах с заданным шагом ΔC_i . Фактически здесь формируется своеобразный банк данных для типичных объектов. При этом для поиска окончательного решения в соответствии с (1) можно ограничиться непосредственно полученным дискретным набором, если шаги варьирования ΔC_i в расчетах были достаточно малы. В другом варианте для всей совокупности $m = \sum_{i=1}^n m_i$ откликов в n -мерном пространстве подбирается подходящая аппроксимирующая функция, что возвращает нас к аналитическому представлению $\tilde{R}^*(C_i)$. Такой подход, очевидно, обеспечивает универсализацию метода.

Если первичная информация, регистрируемая уже при однократном испытании объекта, оказываются замкнутой по отношению ко всей совокупности представляющих интерес параметров модели C_i , причем так, что решением уравнения или фактически системы уравнений (1) выполняется независимая и однозначная оценка каждого из них, то в этом случае будем конкретизировать описанную процедуру как метод единичного формализованного отклика. Это условие, очевидно, является естественным в задачах идентификации факторов реальной нагруженности элементов конструкций. Однако заметим, что для оценки внутренних характеристик $\{g_i\}$ самого объекта нередко требуется проведение серии специальных экспериментов с качественной и количественной вариацией параметров внешнего воздействия, полагаемых здесь известными. При этом формализованные деформационные отклики в рамках каждого частного испытания могут либо включать отдельные группы искомым величин C_i в связанном виде, принципиально не допускающим их разделения, либо вообще не содержать какие-либо из параметров модели. В этих случаях полная совокупность изучаемых характеристик устанавливается путем совместного анализа всего полученного множества частных откликов, отношения между которыми также связываются некоторыми априорно принятыми номинальными зависимостями. Такой подход позиционируется как метод совокупного формализованного отклика.

Таким образом, краткое определение метода включает:

- по-возможности, предельную априорную схематизацию явления, базирующуюся на ограниченном числе неизвестных числовых параметров;
- аналитическое либо численное решение прямой задачи механики деформируемого твердого тела в данной постановке и получение формализованного вида, ожидаемого в эксперименте единичного или совокупного отклика;

- планирование и проведение эксперимента, регистрируемые отклики в котором обеспечивают определение всех искомым параметров редуцированной модели методами статистического соответствия;

- статистическую и смысловую оценки адекватности принятой априорной схематизации, позволяющие либо удовлетвориться полученными результатами, либо обоснованно изменить содержание модели, либо интерпретировать результаты, как условные.

3. Показательный эксперимент

Продемонстрируем метрологические возможности рассмотренного способа интерпретации экспериментальных данных на примере восстановления параметров системы, включающей нагружаемую давлением p кольцевую пластину с жесткой вставкой, имеющей дополнительную упругую связь с заранее неопределенной жесткостью K , рис.1. Толщина пластины $h = 2$ мм. Материал – алюминиевый сплав Д16Т. На рис.2 показаны голографические интерферограммы ее изгиба, записанные при различных значениях K . Напомним [5, 6], что полосы на подобных картинах представляют собой геометрические места точек равных нормальных перемещений – прогибов w . Их расчет выполняется по формуле:

$$w = \frac{N \lambda}{2},$$

где N – целочисленный порядок полосы, λ – длина волны используемого лазерного излучения. (Для He-Ne лазера $\lambda = 0,6328$ мкм, то есть цена полосы составляет 0,3164 мкм.) Математическая обработка картин полос в данном случае заключалась в получении экспериментальных значений $w(r_i)$, распределенных вдоль четырех диаметров с направляющими углами: 0° (горизонтальная ось), 45° , 90° (вертикальная ось) и 135° .

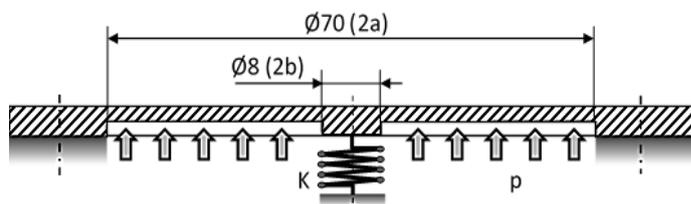


Рисунок 1. Объект испытаний – кольцевая пластина с жесткой подкрепленной вставкой.

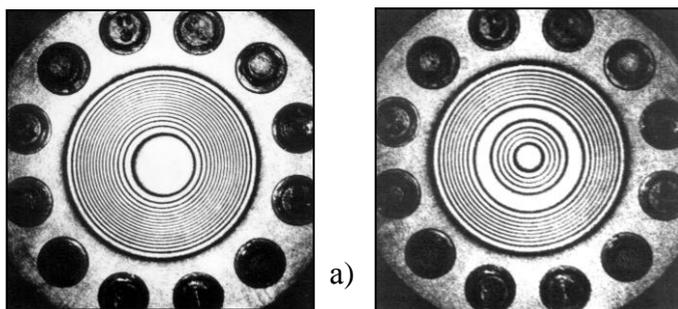


Рисунок 2. Интерферограммы изгиба пластины при некоторых значениях жесткости K упругого подкрепления: K_1 (а) и $K_2 > K_1$ (б).

В нулевом приближении, то есть в предположении осевой симметрии поля прогибов, данные, получаемые для нескольких направлений сканирования, усреднялись. Если рассматривать пластину как идеальный объект, к которому применима классическая теория изгиба, и ограничиться только формально заданными факторами воздействия – равномерным давлением p и центральной силой F , действующей со стороны упругого подкрепления (рис.3а), то ожидаемая форма отклика определяется известным

аналитическим решением дифференциального уравнения равновесия Софи-Жермен [11]:

$$w_0^*(r) = \frac{p}{64D} r^4 + \frac{F}{8\pi D} r^2 \ln \frac{r}{a} + A_0 + A_1 r^2 + A_2 \ln \frac{r}{a}, \quad (2)$$

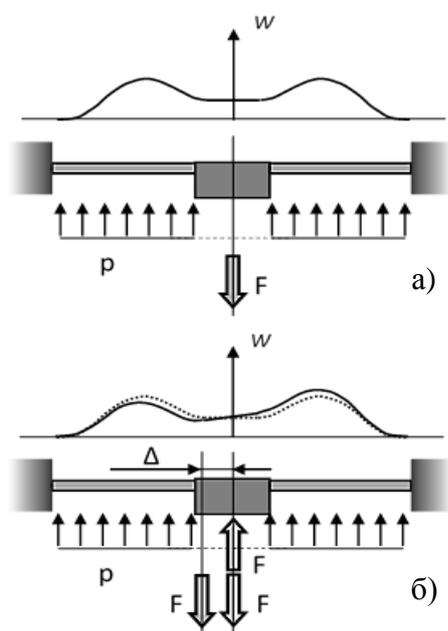


Рисунок 3. Исходная (а) и расширенная (б) расчетные схемы.

где $D = Eh^3/[12(1 - \nu^2)]$ – цилиндрическая жесткость, то есть конкретизированный параметр g_1 . (E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.) Значения констант A_k в (2) характеризуют реальные граничные условия. Если принять, что контуры пластины закреплены с заранее неопределенной конечной жесткостью, то данные константы также должны рассматриваться как параметры модели, подлежащие оценке в соответствии с (1) [12]. Дискретные экспериментальные распределения $w(r_i)$ аппроксимировались по методу наименьших квадратов (МНК) зависимостью (2) с расчетом значений коэффициентов регрессии. Вычисленные в итоге коэффициенты при функциях-слагаемых (r^4) и $(r^2 \ln r/a)$ с точностью до числовых множителей дают искомые оценки параметров (p/D) и (F/D) . Если принять, что значение p измерено с достаточной точностью, то первый из указанных параметров фактически определяет экспериментальную оценку реальной

цилиндрической жесткости пластины D . В свою очередь это позволяет по коэффициенту при $(r^2 \ln r/a)$ вычислить значение сосредоточенной силы F . Результаты выполненных расчетов приведены в таблице 1. Здесь же указаны и значения экспериментальных оценок, собственно, жесткости упругого подкрепления центральной вставки, определяемые из соотношения: $K = (F - p\pi b^2)/w_c$, где w_c – ее поступательное смещение.

Полученные значения являются формальными в рамках принятой расчетной схемы. Вместе с тем, даже на основе детального визуального анализа интерферограмм на рис.2 можно удостовериться в отсутствии строгой осевой симметрии полей прогибов в обоих случаях. Обоснованные выводы об адекватности выбранной модели могут быть сделаны, в частности, на основе анализа остатков $d_i = w_0^*(r_i) - w(r_i)$. В предположении достаточности модели и нормального закона для ошибок измерений вычисленные распределения $d_i(r_i)$ должны удовлетворять «симметричному» случайному разбросу относительно графика аппроксимирующей функции, а присутствие того или иного тренда будет свидетельствовать о наличии пропущенных факторов [10]. Предварительное усреднение данных, очевидно, нивелирует реальные возмущения осевой симметрии. Если же выполнить МНК-аппроксимацию экспериментальных прогибов порознь для каждой диаметральной линии сканирования с использованием того же номинального поля (2), то получаемые при этом распределения остатков будут явно демонстрировать неполное соответствие формы реального отклика объекта возможно-

стям принятого его номинального представления. В качестве иллюстрации на рис.4а отражена такая ситуация для первого из вариантов нагружения.

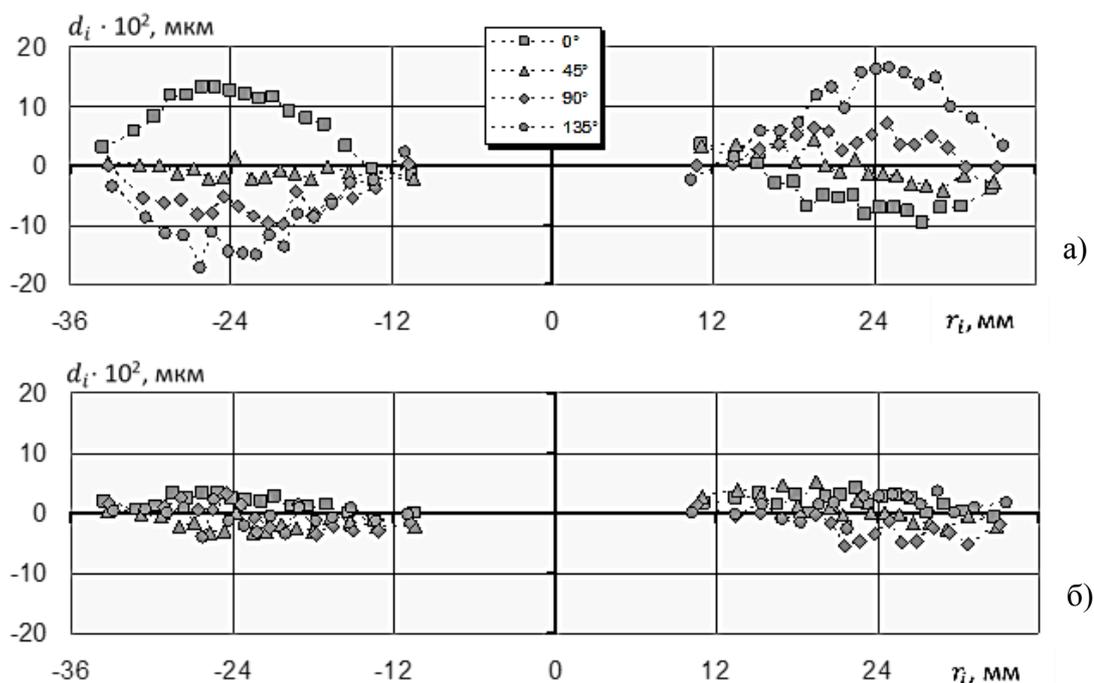


Рисунок 4. Графики остатков после МНК-аппроксимации распределений прогибов функциями w_0^* (а) и w_Σ^* (б) в варианте нагружения при $K = K_1$.

Таблица 1. Рассчитанные значения параметров жесткости и нагруженности системы «пластина – упругое подкрепление».

вариант	а) $p = 2,94 \cdot 10^{-2}$ МПа; K_1		б) $p = 4,90 \cdot 10^{-2}$ МПа; $K_2 > K_1$	
номин. поле	$w_0^*(r)$	$w_\Sigma^*(r, \varphi)$	$w_0^*(r)$	$w_\Sigma^*(r, \varphi)$
w_c , мкм	5,3		1,7	
D , Н·м	50,5	50,7	49,6	49,6
F , Н	-17,5	-17,3	-51,7	-51,7
F/p , м ²	$-5,99 \cdot 10^{-4}$	$-5,92 \cdot 10^{-4}$	$-1,04 \cdot 10^{-3}$	$-1,04 \cdot 10^{-3}$
K , Н / мкм	3,02	2,99	29,0	28,9
M , Н·м	–	$1,79 \cdot 10^{-3}$	–	$1,91 \cdot 10^{-3}$
M/p , м ³	–	$6,13 \cdot 10^{-6}$	–	$3,86 \cdot 10^{-6}$
γ , °	–	134	–	100
Δ , мм	–	0,11	–	0,04

Природу пропущенного фактора можно установить как посредством анализа полученных предварительных данных, так и с помощью каких-либо априорных сообра-

жений. Из приведенных графиков распределения остатков следует, что направления наибольшего возмущения осевой симметрии оказываются различными для каждого из вариантов нагружения пластины, поэтому само это возмущение не может быть связано с какими-либо отклонениями в ее геометрии (например, клиновидностью). Достаточно естественным здесь выглядит предположение о возможной эксцентricности Δ реально действующей нагрузки F , что добавляет в схематизацию системы нагрузок дополнительный параметр – сосредоточенный изгибающий момент $M = F \cdot \Delta$, рис. 3б. В этом случае формализованное поле может быть представлено в виде:

$$w_{\Sigma}^*(r, \varphi) = w_0^*(r) + w_M^*(r, \varphi),$$

где слагаемое $w_M^*(r, \varphi)$ конкретизируется на основе формулируемого в рядах общего решения А. Клебша для соответствующего случая изгиба пластин [11]. Пусть момент M действует в свойственном каждому случаю направлении, которое характеризуется неизвестным углом γ . Ограничиваясь только первым членом ряда, будем иметь:

$$w_M^* = \left(-\frac{M}{4\pi D} r \ln \frac{r}{a} + B_1 r + B_2 r^3 + B_3 r^{-1} \right) \cos(\varphi - \gamma),$$

где константы B_k , как и ранее, определяются реальными условиями закрепления пластины. (Как можно заметить, регрессионный анализ здесь приобретает нелинейный характер относительно параметра γ .) Вычисленные в результате коэффициенты регрессии дают в итоге все параметры расширенной модели, представленные в таблице 1. Достаточно высокая степень адекватности сделанных оценок подтверждается полученными здесь графиками остатков $d_i = w_{\Sigma}^*(r_i) - w(r_i)$, показанными на рис.4б и демонстрирующими как снижение их общего уровня по сравнению с предыдущим случаем, так и минимизацию тренда. Анализируя представленные данные, замечаем, что усложнение модели здесь практически не отразилось на значениях ранее полученных величин, что достаточно очевидно, так как функции w_0^* и w_M^* ортогональны в заданной области.

4. Дополнительные замечания об области применения метода

Метод формализованного отклика фактически используется во многих практических исследованиях, связанных с расчетом тех или иных характеристик механических систем на основе высокоинформативных экспериментальных данных. Таким образом выполняется, например, определение остаточных напряжений в элементах конструкций по результатам испытаний с применением метода зондирующих отверстий [13]. Компоненты тензора напряжений, имевших место в точке сверления, рассчитываются путем минимизации отклонений фактического измеренного деформационного локального отклика от его ожидаемого вида, получаемого аналитически – для сквозных зондирующих отверстий в тонкостенных телах или с помощью моделирования методом конечных элементов – для глухих отверстий в массивных объектах. Корректный расчет двух нормальных и касательного напряжений в заданной точке выполняется с использованием полей обеих тангенциальных компонент перемещений $u(r, \varphi)$ и $v(r, \varphi)$, регистрируемых независимо, например, с помощью электронной спекл-интерферометрии, рис. 5 а, б. Поэтому, в соответствии со сказанным ранее, здесь реализуется метод совокупного формализованного отклика. Отметим, что если значения остаточных напряжений в материале приближаются к пределу текучести (хотя и не превышают его), то реальные отклики в зоне засверловки будут содержать пластическую составляющую [14]. Несмотря на это, обработка данных эксперимента все же, как правило, осуществляется

в упругой постановке задачи, что приводит к неопределенному завышению значений искомым напряжений. Следовательно, итоговые результаты в этих случаях должны трактоваться как условные.

Параметры механики разрушения (коэффициенты интенсивности напряжений, Т-напряжения) могут быть вычислены путем сопоставления регистрируемых совокупных деформационных откликов в окрестности вершины трещины в форме полей тангенциальных компонент перемещений (рис. 5 в, г) с их формальными ожиданиями в виде асимптотических разложений М. Вильямса [15, 16]. Понятие формализованного отклика фактически используется также в задачах дефектоскопии для геометрической идентификации скрытых (подповерхностных) трещиноподобных дефектов [16, 17].

К этому же типу в ряде случаев можно отнести и задачи исследования механических свойств материалов. Здесь достаточно простая форма объекта (образца) и заданная схема его нагружения таковы, что позволяют напрямую (или почти напрямую) отождествлять его деформационную жесткость (оценка $\{g_i\}$) с некоторыми абстрактными характеристиками, собственно, материала, из которого он изготовлен. В частности, в [18] таким путем определяются константы упругости анизотропных композитных материалов при испытаниях на изгиб образцов в виде балок-полос. Экспериментальной базой для расчетов является совокупный деформационный отклик, получаемый путем измерений с помощью спекл-интерферометрии полей прогибов в образцах с различной ориентацией относительно главных осей ортотропии материала, рис.5 д, е. Формализованный вид для соответствующих откликов определяется аналитическим решением соответствующей задачи теории упругости анизотропного тела.

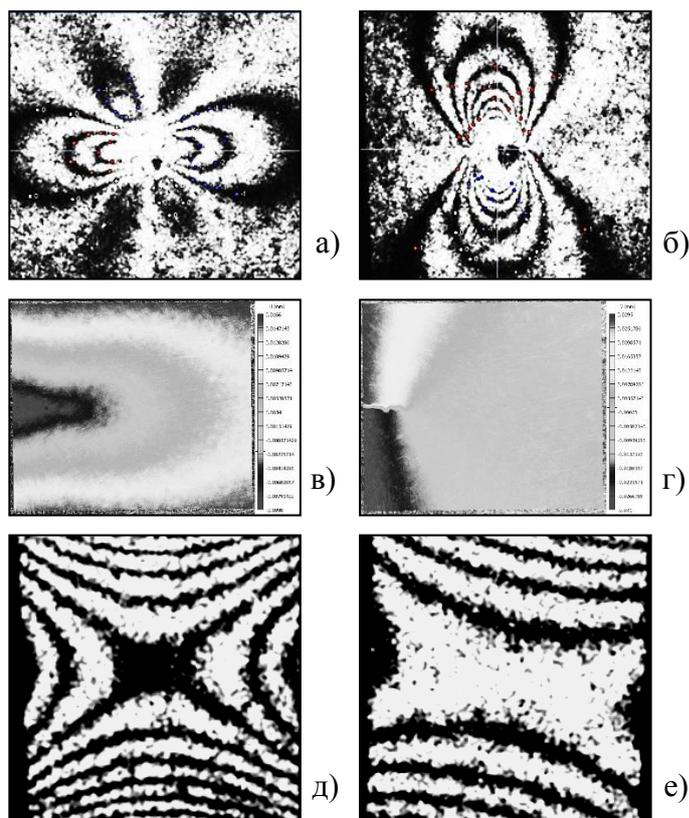


Рисунок 5. Поля тангенциальных (а – г) и нормальных (д – е) перемещений, визуализируемые оптическими методами:

а, б – типичные картины полос полей перемещений в зоне сверления отверстия, получаемые методом спекл-интерферометрии при определении в теле остаточных напряжений;

в, г – распределения продольных и поперечных перемещений в окрестности вершины трещины, зарегистрированные с помощью метода корреляции цифровых изображений;

д, е – поля прогибов, нагруженных изгибающим моментом образцов из анизотропного (композитного) материала при их ориентации вдоль главной оси анизотропии (д) и под углом 45° к ней (е).

5. Заключение

Математическая обработка квази-континуальных полей перемещений, измеряемых на поверхности деформированного тела с использованием высокоинформативных оптических средств, зачастую сводится к их численному дифференцированию с целью вычисления компонент тензора деформаций на основе соотношений Коши. В дальнейшем совершается переход к значениям напряжений, и по ним производится оценка, например, фактического запаса прочности исследуемого объекта.

Иной – описанный выше – подход к расширенной интерпретации исходной информации имеет целью восстановление характеристик реальной нагруженности элемента конструкции и/или оценку его жесткостных свойств. Задачи такого рода относятся к классу обратных, и их решение в общем случае вызывает значительные трудности. Ситуация существенно упрощается, если заранее может быть указан общий функциональный вид ожидаемого деформационного отклика объекта в формализованном виде, определенном до ряда неизвестных числовых коэффициентов. При этом их значения, непосредственно связанные с искомыми величинами в конкретной задаче, достаточно просто вычисляются путем минимизации невязки между условно формализованными и экспериментально измеренными полями перемещений. Этот подход вполне естественен и фактически применяется во многих практических работах. В данной статье принята попытка его обобщения и номинирования как метода «формализованного отклика». В такой формулировке он мог бы использоваться в дальнейшем при изложении конкретных рабочих методик в области экспериментальной механики.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 743 с.
2. Ватульян, А. О. Обратные задачи механики деформируемого твердого тела. – М.: Физматлит, 2007. – 224 с.
3. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач. / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин // – М.: Наука – 1979. – 288 с.
4. Чернятин, А. С. Методический подход и программа для оценки нагруженности, дефектности и деградации свойств материалов конструкций на основе обработки экспериментальных данных. / А. С. Чернятин, И. А. Разумовский // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2017. – № 5. – С. 64–74.
5. Джоунс, Р. Голографическая и спекл интерферометрия. / Р. Джоунс, К. Уайкс // – М.: Мир – 1986. – 328 с.
6. Разумовский, И. А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. – М.: Изд. МГТУ им. Баумана, 2007. – 240 с.
7. Луценко, А. Н. Исследование процесса деформации материала оптико-корреляционными методами. / А. Н. Луценко, И. Н. Одинцев, А. В. Гриневич, П. Б. Северов, Т. П. Плугатарь // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – №S4. – С.70-86.
8. Одинцев, И. Н. Применение оптико-корреляционных методов в задачах экспериментальной механики. / И. Н. Одинцев, А. А. Апальков, А. М. Кокуров, Т. П. Плугатарь, С. М. Усов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДНТУ, 2015. – №1(51). – С. 152-160.
9. Любутин, П. С. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов. / П. С. Любутин, С. В. Панин, В. В. Титков, А. В. Еремин, Р. Сундер // Вестник Пермского нацио-

нального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 87-107.

10. Себер, Дж. Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980. – 456 с.

11. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки. / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер // – М.: Наука – 1966. – 635 с.

12. Одинцев, И.Н. Оценка реальных условий деформирования осесимметричных пластин с использованием результатов голографического эксперимента. / И. Н. Одинцев, В. П. Щепинов, В. В. Яковлев // Прочность и долговечность материалов и конструкций атомной техники. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – С. 82-84.

13. Одинцев, И. Н. Исследование поверхностных и объемных распределений остаточных напряжений с применением электронной цифровой спекл-интерферометрии. // В кн.: Перспективные методы поверхностной обработки деталей машин. / Под. ред. Г. В. Москвитина. М.: ЛЕНАНД, 2019. – С. 429-446.

14. Апальков, А. А. Оценка диапазона достоверных измерений остаточных напряжений методом сверления отверстий. / А. А. Апальков, И. Н. Одинцев, А. С. Плотников // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – Т.82. – № 2. – С. 47-52.

15. Степанова, Л. В. Определение коэффициентов разложения М. Уильямса поля напряжений у вершины трещины с помощью метода цифровой фотоупругости и метода конечных элементов. / Л. В. Степанова, О. Н. Белова, В. А. Туркова // Вестник Самарского университета. Естественная серия. – 2019. – Т. 25. – № 3. – С. 62–82.

16. Апальков, А. А. Экспериментально-расчетный анализ трещиноподобных дефектов. / А. А. Апальков, И. Н. Одинцев, С. М. Усов // Сборник докладов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 2015. Казань: Изд. Казанского (Приволжского) Федерального университета, 2015. – С. 195-197.

17. Apalkov, A. A., Geometrical Identification of Invisible Defects in Structural Elements Basing on Digital Image Correlation Data. / A. A. Apalkov., I. N. Odintsev, S. M. Usov // Proceeding of the International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, 2019 (ICMTME 2019) / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. – V. 709 (3). – P. 033038.

18. Odintsev I. N. Investigation of Elastic Properties of Composite Materials with Use of ESPI. // Proceeding of the International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, 2020 (ICMTMTE 2020) / Materials Today Proceedings, 2021. – V. 38. – Part 4. – P. 1919–1924.

Поступила в редколлегию 14.03.2022 г.