

МЕТОДОЛОГИЯ И ПРОГРАММА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ОПТИЧЕСКИХ И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

И. А. Разумовский, А. С. Чернятин

Реферат. В статье представлен новый методический подход к определению параметров напряженно-деформированного состояния элементов натуральных конструкций, основанный на сопоставлении экспериментальных данных с результатами расчетов соответствующих модельных задач численными методами. В качестве способов получения необходимой экспериментальной информации используются интерференционно-оптические методы. Рассмотрены теоретические основы методики, особенности ее программной реализации, а также вопросы оценки точности получаемых результатов расчетов. Особенности применения метода показаны на ряде тестовых задач определения статической нагруженности конструкций различного типа.

Ключевые слова: интерференционно-оптические методы, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементная модель

Введение

Методы исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций, основанные на интерференционно-оптических способах регистрации полей деформаций или перемещений (поляризационно-оптические методы, методы голографической интерферометрии, спекл-фотографии, электронной цифровой спекл-интерферометрии) обеспечивают непрерывное получение информации на поверхности исследуемого объекта [1, 2]. Эти методы, широко используемые для решения задач механики деформированного твердого тела, механики разрушения, вибродиагностики,

динамики конструкций и т.д., имеют определенные преимущества перед традиционными измерительными средствами, которые позволяют регистрировать только усредненные (накопленные на известной базе) величины деформаций или перемещений в одном направлении и в заданной точке. Достоверность результатов таких измерений, как правило, требует дополнительного обоснования.

Из интерференционно-оптических методов наиболее широко в современной практике применялся метод фотоупругих покрытий, а в последние годы – метод электронной цифровой спекл-интерферометрии (ЭЦСИ). Существен-

ным преимуществом этих методов является возможность создания компактной и надежной измерительной аппаратуры, которая может быть эффективно использована в натурных условиях. Кроме того, развитие современных компьютерных технологий открывает возможности как повышения точности результатов измерений, так и разработки принципиально новых методических подходов к решению задач механики.

При исследовании объекта на основе обработки экспериментальных данных, получаемых интерференционно-оптическими методами, определение параметров его НДС включает в себя три основных этапа:

- регистрацию базовой информации на основе тех или иных эффектов интерференционной оптики (фоторегистрация интерференционных картин, запись голограмм, регистрация изображений со спекл-структурой и т.п.);
- представление получаемой информации на электронных носителях в цифровом формате в терминах разностей фаз световых волн или (после первичной обработки) непосредственно в величинах компонент трехмерного вектора перемещений точек поверхности тела;
- определение параметров НДС на основе обработки исходной экспериментальной информации.

Определяемыми параметрами НДС могут быть как локальные характеристики – деформации или напряжения, определяемые на основе обработки полей перемещений, так и интегральные характеристики – например, параметры механики разрушения (коэффициенты интенсивности напряжений – КИН, J -интеграл и др.) или величины внутренних силовых факторов в сечениях исследуемого объекта. К интегральным характеристикам НДС можно отнести также и характеристики деформирования материалов, для определения которых разработаны методики, основанные на обработке интерференционных картин, получаемых при нагружении образцов [3].

Можно утверждать, что в традиционных методах определения параметров НДС используется единый методический подход, в основе которого лежат *априори* известные соотношения между искомыми параметрами и экспериментальными данными. Это касается как «простейших» задач определения деформаций по полям перемещений на основе зависимостей Коши, так и более сложных проблем. К последним,

в первую очередь, следует отнести:

методы определения параметров механики разрушения (коэффициентов интенсивности напряжений или J -интегралов с учетом асимптотических решений канонических сингулярных краевых задач для тел с трещинами [2, 4, 5];

методы определения остаточных напряжений (ОН) с учетом считающимися *априори* известными законами их распределения в рассматриваемой зоне объекта [1, 4, 6].

Постановка задачи

В работе предлагается экспериментально-расчетный метод определения параметров НДС, который базируется на оценке соответствия массивов экспериментальных данных и результатов расчетов модельных краевых задач, полученных численными методами, при постановке которых имеется возможность учесть все особенности геометрии области, характера рассматриваемых нагрузок и деформационных характеристик материалов.

Предлагаемая процедура определения параметров НДС состоит в следующем. Искомые параметры P_j , в качестве которых могут рассматриваться величины усилий, остаточных напряжений, КИН и т.д., определяются на основе минимизации целевой функции, характеризующей отклонения экспериментально определяемых параметров e_i^* (это могут быть деформации, компоненты вектора перемещений и т.д.) в N точках от их расчетных значений e_r , получаемых в результате численного решения прямой задачи. Соответствующая процедура сводится к организации итерационного процесса, на каждом шаге которого определяются величины параметров P_j и соответствующие им значения e_r , а в качестве решения принимаются значения P_j , при которых целевая функция достигает минимума. Следует отметить, что задача заключается в определении именно величин параметров P_j на основе заранее принятого закона их распределения.

Для получения исходной экспериментальной информации предусматривается использование метода ЭЦСИ или метода фотоупругих покрытий.

Описание программного комплекса

Методика определения параметров НДС на основе экспериментально полученных массивов данных о полях перемещений (при использовании метода ЭЦСИ) или раз-

ностей главных деформаций (при использовании метода фотоупругих покрытий) реализована в виде единого программного комплекса, основанного на автоматическом взаимодействии конечно-элементного ПК *ANSYS* и *MATLAB* (рис. 1). В него входят программа обработки интерференционных картин, основная (управляющая) программа «Численный эксперимент», вспомогательные макросы различного назначения и ряд подпрограмм вспомогательного характера.

Программа обработки интерференционных картин с графическим интерфейсом (разработана в среде *MATLAB*) позволяет непосредственно на загруженных в компьютер интерференционных картинах интерактивно формировать массивы экспериментальных данных в произвольных точках измерений, а также выполнять ряд важных операций, обеспечивающих автоматическое применение полученных данных в расчетах.

Управляющая программа (реализована в среде *MATLAB*, имеет графический интерфейс) выполняет:

- прямое решение соответствующей краевой задачи, при заданных геометрии и значениях искомых параметров P_j ;
- создание своего рода банка (базы) деформационных откликов e_j ;
- решение обратной задачи (в данном случае проводить вычисление значений P_j на основе экспериментальных данных e_i^* ;
- анализ влияния различных факторов (погрешность данных экспериментов, геометрии области, начальных оценок искомых параметров P_j и др.) на устойчивость решения.

Решение прямой задачи заключается в получении полей откликов, а в частности, в определении величин откликов в заданных точках измерений. Для этого используются специализированные макросы, обеспечивающие:

- параметрическое моделирование рассматриваемой области с различными особенностями (например, с учетом слоистости материала, а также отверстий и трещин, и т.д.) и ее автоматическое разбиение на элементы – рациональное с точки зрения точности и ресурсоемкости;
- автоматическое образование в рассматриваемой области отверстий (с конической поверхностью в вершине), количество и взаимное расположение которых неограниченно. Следует отметить, что нет принципиальных ограни-

чений для применения вырезов произвольной формы, так как это сводится лишь к созданию макроса, осуществляющего «встраивание» области выреза с заранее определенной геометрией (даже имеющей функциональную зависимость от координат);

- автоматическое построение в заданной области пространственных, свободно ориентированных, плоских трещин с произвольно задаваемой геометрией фронта и упорядоченной сеткой сингулярных элементов вокруг него (трещина может быть поверхностной, внутренней или сквозной, ее фронт может проходить через неограниченное количество объемов);
- автоматический расчет параметров механики разрушения, включая их распределение вдоль фронта трещины;
- введение искомых параметров задачи P_j ;
- формирование найденных на основе расчетов полей деформационных откликов и определение значений в точках измерения e_i .

Основное внимание было уделено разработке алгоритмов построения перечисленных объектов с реализацией в них общих универсальных свойств и вопросам построения рациональной сетки конечных элементов.

Процедура поиска минимума целевой функции базируется на методе деформируемых симплекс-элементов (метод Нелдера – Мида), реализованном в ПК *MATLAB*. Этот метод безусловной оптимизации обладает высокой устойчивостью даже при плохой обусловленности задачи [7]. В качестве целевой функции принимается среднеквадратическое или максимальное отклонение расчетных значений перемещений от экспериментальных данных, соответственно

$$I_{RMS}(P_j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{e}_i^2}; \quad I_{\max}(P_j) = \max_i |\tilde{e}_i|,$$

где $\tilde{e}_i = [e_i^* - e_i(P_j)] / e_i^*$ – относительное отклонение экспериментальных данных от соответствующих расчетных значений, полученных на текущем шаге итерации.

Решение краевых задач механики деформированного твердого тела в одном ПК (*ANSYS*) и реализация различных математических алгоритмов (минимизации целевой функции, автоматического формирования и использования банка откликов, операций над данными и пр.) в другом ПК (*MATLAB*) стало возможным благодаря разработке специального алгоритма *автоматического непрерывного обмена*

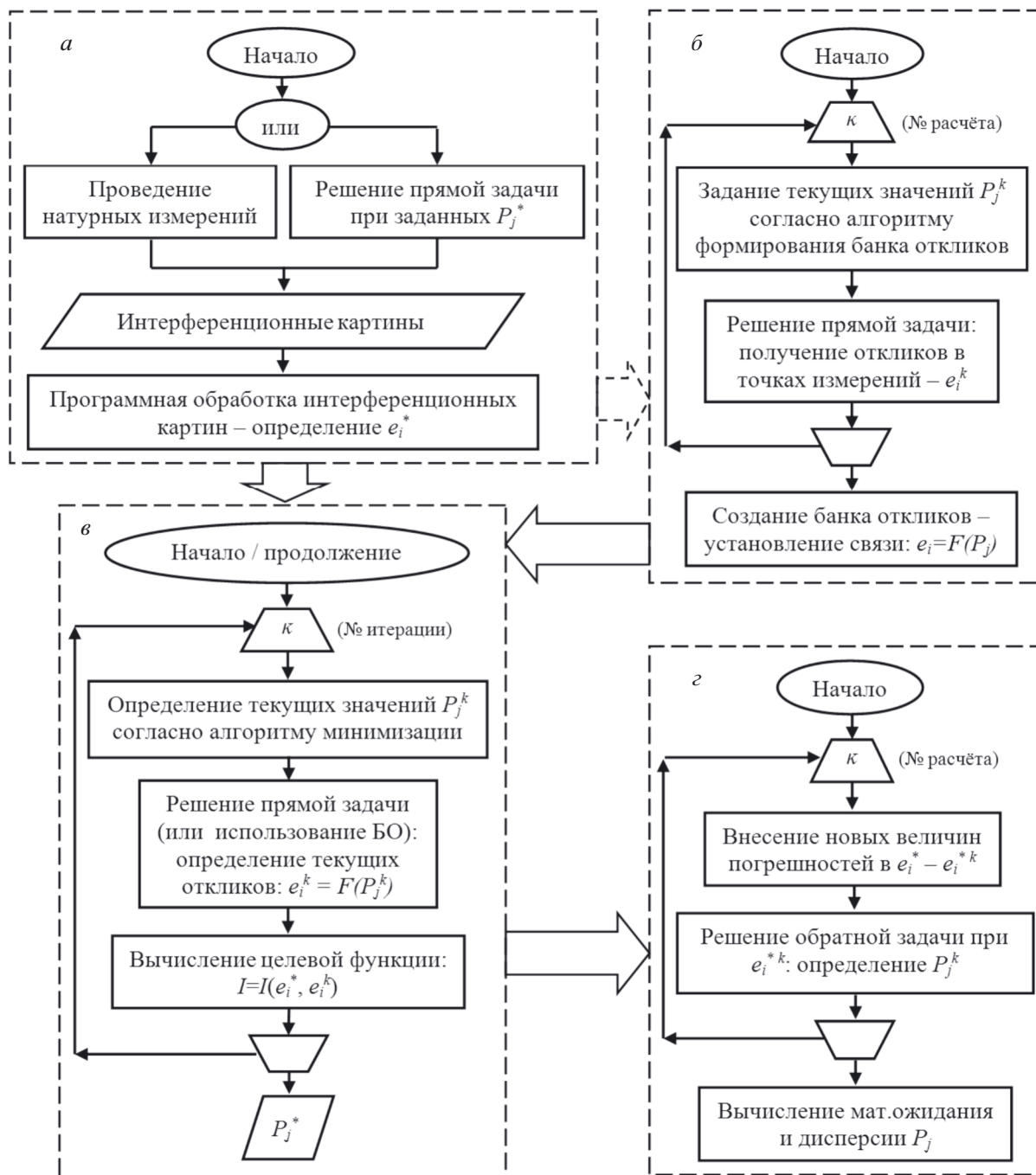


Рис. 1. Принципиальная блок-схема определения параметров НДС на основе математической обработки данных экспериментов:

а) обработка массивов данных (эксперимента или расчета); б) формирование банка откликов; в) решение обратной задачи; г) исследование устойчивости решения

данными между указанными программными комплексами. Для его реализации были разработаны две программы – в средах *MATLAB* и *ANSYS*. Обеспечить совместное функционирование всех программ и макросов, предназначенных для выполнения различных функций, под «руководством» главной программы удалось

за счет использования структурированных списков параметров и данных, называемых далее «протоколами»:

- *протокол модели* (создается пользователем) содержит параметры, необходимые для автоматического построения конечно-элементной модели со всеми особенностями и т.п.;

- *протокол нагружения* (параметров P_j) содержит данные о распределении, величинах и взаимной корреляции нагрузок и пр.; изначально создается пользователем, но может модифицироваться в процессе решения;

- *протокол измерений* создается автоматически программой обработки изображений, содержит информацию о картинах, положениях точек измерений, величинах откликов в них и об «адаптации» всех данных к конечно-элементной модели;

- *протокол проведения решения* (формируется пользователем), содержащий последовательность определения параметров P_j , параметры расчета и информацию о том, какие данные измерений необходимо использовать на каждом этапе.

Применение протоколов позволило полностью автоматизировать решение задачи.

Следует отметить, что при линейной зависимости между параметрами P_j и e_i нет необходимости решать прямую задачу на каждом этапе минимизации целевой функции. Для ускорения процедуры расчетов в заранее заданных точках – точках измерений – могут быть определены (в среде *ANSYS*) коэффициенты податливости системы от действия $P_j=1$, $P_{k \neq j}=0$ ($j=1, \dots, N_p$). Затем для каждой точки создаются векторы компонент откликов (длиной N_p) – своего рода дискретный банк откликов (БО) (в среде *MATLAB*). По принципу суперпозиции и пропорциональности откликов нагрузкам (через податливости) всегда можно вычислить величины откликов при произвольных значениях параметров P_j . При наличии нелинейности между параметрами можно поступить следующим образом. Сеточным способом задаются значения P_j в предполагаемых диапазонах, т.е. фактически создается N_p -мерный массив значений P_j (*MATLAB*). Для различных сочетаний значений P_j , берущихся структурировано из данного массива, вычисляются отклики (в среде *ANSYS*), тем самым для каждой точки измерения (и по каждой компоненте) формируется N_p -мерный массив значений отклика, на основе которого «строится» сплайновая поверхность в гиперпространстве по параметрам. То есть в совокупности создается континуальный банк откликов, и при произвольных значениях параметров P_j можно вычислить отклик в любой интересующей точке и по любой компоненте, интерполируя расчетные данные с помощью соответствующей сплайновой поверхности (в среде *MATLAB*).

Оценка точности результатов

Рассматриваемая методика определения параметров НДС, относится к классу обратных задач, при разработке процедуры решения которой требуется рассмотреть вопросы существования, единственности и устойчивости (решения). Необходимым условием получения ее решения является выбор адекватной модели задачи.

При определении параметров деформационного отклика всегда имеет место экспериментальная погрешность. В связи с этим в процессе исследования проводится серия численных экспериментов, целью которых является анализ устойчивости решения при влиянии различных факторов. Соответствующая процедура состоит в следующем (см. рис. 1). Решается прямая модельная задача при заданных величинах искомых параметров (например, нагрузок на удалении от зоны измерений). На основе результатов решения определяются значения экспериментально полученных величин (например, перемещений в N точках, расположенных на линиях равных перемещений, соответствующих интерференционным картинам, получаемым экспериментально). Затем в эти значения вносятся погрешность, генерируемая случайным образом для каждой точки и не превышающая заданного значения δ , соответствующего экспериментальной погрешности. Именно эти данные рассматриваются в качестве исходной информации для решения обратной задачи по описанной выше (предлагаемой численной) методике. В итоге определяются математическое ожидание и дисперсия P_j .

Использование банка откликов позволило существенно сократить время на постановку каждого численного эксперимента.

Применение методики для определения нагруженности конструкций

Предлагаемая методика и программа прошли апробацию на ряде задач. Все задачи имели общую постановку: рассматривалась область конструкции в виде призматического тела, по боковым граням которого действуют нормальные напряжения, имеющие определенный (заранее неизвестный) закон распределения по глубине. На поверхности высверливается одно или несколько отверстий, что приводит к снятию поверхностных напряжений и появлению на поверхности рассматриваемой области полей

соответствующего деформационного отклика. При этом считается, что в зоне деформационного отклика, вызванного сверлением отверстия, отсутствуют какие-либо дополнительные источники возмущения НДС. Задача состоит в том, чтобы по этим полям определить величины напряжений (нагрузок), действующих на удалении от зоны отверстия или непосредственно на поверхности отверстия.

Оценка нагруженности конструкций с поверхностными трещинами. В работе [8] при проведении конструкционного торможения поверхностных трещин [9], заключающегося в высверливании в зоне вершины трещины малого отверстия, предлагается проводить также оценку нагруженности данной области конструкции по полям деформационного отклика, вызванным образованием отверстий.

В качестве экспериментального метода регистрации откликов в работе [8] предполагалось использовать метод ЭЦСИ, позволяющий зарегистрировать поле перемещений на поверхности объекта с чувствительностью порядка 0,1 мкм. Вместе с тем, в настоящее время для проведения исследований в натурных условиях следует отдать предпочтение методу фотоупругих покрытий, аппаратура которого является значительно более простой и надежной (при том же уровне чувствительности).

В основе метода фотоупругих покрытий лежит определение на поверхности объекта разности главных деформаций ε_I и ε_{II} , действующих вдоль поверхности. Процедуру определения их разности, можно свести к выполнению алгебраических операций между полями дефор-

маций $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ непосредственно получаемых в ПК *ANSYS* (при $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$):

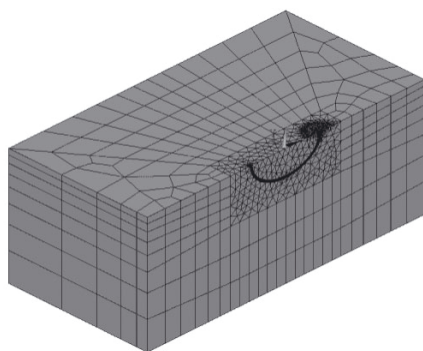
$$\varepsilon_I - \varepsilon_{II} = \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}.$$

Здесь x, y, z – декартовы координаты; z – нормаль к поверхности; ось x лежит в плоскости трещины.

Решения модельных задач при различных нагрузках показали, что поле $\varepsilon_I - \varepsilon_{II}$ существенно локализовано около отверстия (имеет высокий градиент). Поскольку расчет деформаций выполняется на основе дифференцирования полей перемещений, для обеспечения требуемой точности вычисления разности $\varepsilon_I - \varepsilon_{II}$ схема конечно-элементного разбиения рассматриваемой области (рис. 2) предусматривает существенное сгущение сетки конечных элементов в зоне отверстия, примыкающей к поверхности объекта (см. рис. 2, б).

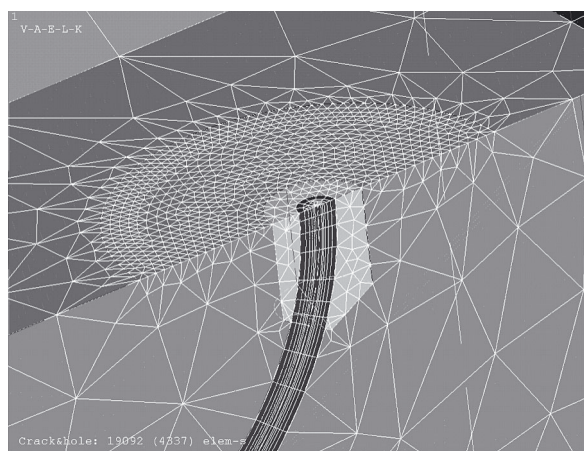
Рассматривается полупространство с плоской трещиной (см. рис. 2, а) в однородном поле растягивающих напряжений $\bar{\sigma}_1 = 1,0$ и $\bar{\sigma}_2 = 1,0$, действующих вдоль и перпендикулярно плоскости трещины, соответственно. Форма ее фронта, с учетом известных результатов [10, 11] и основанных на них нормативных материалов [12], может быть принята полуэллиптической. Размер трещины $2a$ на поверхности конструкции считается известной величиной (a – большая полуось эллипса), а глубина (малая полуось эллипса) $b = 2a/3$. Геометрия фронта не является принципиальным ограничением, и при наличии соответствующей информации разработанный макрос позволяет генерировать трещину любой формы.

ELEMENTS



Crackhole: 8975 (1665) elem-s

а



б

Рис. 2. Схема сеточного разбиения модельной задачи:

а – полная модель упругого полупространства с полуэллиптической трещиной (с учетом симметрии задачи); б – зона отверстия

Для исследования влияния разброса значений экспериментально определяемой разности $\varepsilon_I - \varepsilon_{II}$, а также количества и локализации точек измерений на погрешность определяемых напряжений $\overline{\sigma}_1 = 1,0$ и $\overline{\sigma}_2 = 1,0$ был проведен численный эксперимент, процедура которого излагалась выше. На основе решения прямой модельной задачи определялись величины разностей главных деформаций в N точках, расположенных на линиях $\varepsilon_I - \varepsilon_{II} = \text{const}$ (рис. 3) в области $1,2 \leq |\bar{r}|/\rho \leq 3,0$, соответствующих интерференционным картинам, получаемым методом фотоупругих покрытий ($\bar{r}$ – радиус-вектор, начало которого расположено в центре зондирующего отверстия, ρ – радиус отверстия). Диапазон разброса относительной погрешности эксперимента принимался $\delta_1 = 10\%$ и $\delta_2 = 20\%$. Для каждого из условий численного эксперимента (то есть величин δ , N и области локализации точек «измерений») выполнялось 100 расчетов обратной задачи. Заметим, что благодаря использованию банка откликов время одного расчета на современном компьютере составило в среднем 5–10 сек. В итоге определялись математическое

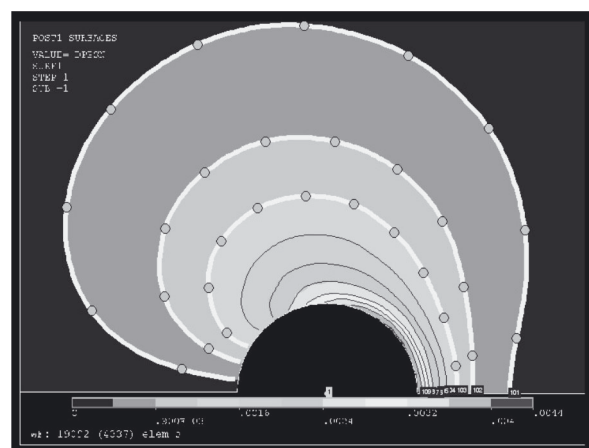


Рис. 3. Типичная картина разностей главных деформаций в зоне отверстия, полученная на основе расчета прямой задачи:
○ – точки измерений

ожидание и дисперсия $\overline{\sigma}_1 = 1,0$ и $\overline{\sigma}_2 = 1,0$.

В ходе численных экспериментов была проведена оценка влияния погрешности экспериментальных данных, количества точек измерений и их локализации на погрешность результатов (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Оценка влияния погрешности экспериментальных данных

№	Условия численного эксперимента	%	Математическое ожидание				Дисперсия			
			Целевые функции, использовавшиеся для минимизации							
			I_{RMS}		$I_{\max}$		I_{RMS}		$I_{\max}$	
			$\overline{\sigma}_1$	$\overline{\sigma}_2$	$\overline{\sigma}_1$	$\overline{\sigma}_2$	$\overline{\sigma}_1$	$\overline{\sigma}_2$	$\overline{\sigma}_1$	$\overline{\sigma}_2$
1	$N = 30; 2 \leq \overline{r} / \rho \leq 3,0$	10	0,995	0,993	0,992	0,991	0,032	0,012	0,029	0,007
		20	0,977	0,973	0,970	0,967	0,066	0,024	0,055	0,014
2	$N = 30; 1,2 \leq \overline{r} / \rho \leq 2,0$	10	0,993	0,994	0,992	0,992	0,082	0,017	0,055	0,011
		20	0,970	0,976	0,966	0,967	0,161	0,033	0,107	0,023
3	$N = 60; 2 \leq \overline{r} / \rho \leq 3,0$	10	0,995	0,993	0,992	0,991	0,026	0,009	0,017	0,003
		20	0,977	0,974	0,966	0,964	0,054	0,018	0,033	0,007
4	$N = 60; 1,2 \leq \overline{r} / \rho \leq 2,0$	10	0,994	0,993	0,992	0,991	0,058	0,012	0,030	0,006
		20	0,973	0,974	0,963	0,963	0,117	0,023	0,061	0,011

Таблица 2

Оценка влияния погрешности экспериментальных данных при $\delta = 10\%$

Условия численного эксперимента	Нормы	Математическое ожидание				Дисперсия			
		$\overline{\sigma}_1^e$	$\overline{\sigma}_2^e$	$\overline{\sigma}_1^H$	$\overline{\sigma}_2^H$	$\overline{\sigma}_1^e$	$\overline{\sigma}_2^e$	$\overline{\sigma}_1^H$	$\overline{\sigma}_2^H$
N=21	I_{RMS}	0,994	1,003	0,987	0,965	0,032	0,064	0,162	0,148
	$I_{\max}$	0,988	0,996	1,021	0,998	0,021	0,048	0,063	0,076
N=42	I_{RMS}	0,995	0,994	0,990	0,999	0,020	0,040	0,107	0,099
	$I_{\max}$	0,987	0,992	1,018	1,007	0,010	0,030	0,035	0,050

Анализ этих результатов, позволил сформулировать требования, при выполнении которых обеспечивается достаточная для практики точность определения искомых параметров нагруженности конструкции. В частности, при относительной погрешности экспериментальных данных $\delta \leq 20\%$ и общем количестве точек измерения $N \geq 30$ математическое ожидание величин искомых параметров $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2$ лежит в пределах 3–4% от их точных значений, а дисперсия – около 10% при использовании в качестве целевой функции максимального отклонения $I_{\max}$. Точки измерений предпочтительнее брать из области, заключенной в диапазоне $\approx 1,5 \leq |\bar{r}|/\rho \leq 3$. Отметим, что при использовании нормы I_{RMS} на процесс решения затрачивается в среднем в полтора раза меньше времени, чем при использовании $I_{\max}$.

Оценка нагруженности тонкостенных элементов конструкций (без трещин)

В качестве примера рассмотрим пластину с отверстием при совместном действии растяжения и изгиба (рис. 4). Предполагается, что в исследуемой зоне нормальные напряжения линейно изменяются по толщине в двух ортогональных направлениях 1 и 2.

Напряженное состояние характеризуется напряжениями (параметрами P_j), действующими в нижней σ_1^H, σ_2^H и верхней σ_1^B, σ_2^B лицевых поверхностях пластины.

При решении модельной задачи было принято: $h=3$ мм, $\sigma_1^H=150$ МПа, $\sigma_2^H=150$ МПа, $\sigma_1^B=100$ МПа, $\sigma_2^B=200$ МПа, $E=2 \times 10^5$ МПа, $\mu=0,3$ (материал – сталь). Заметим, что выбор близких по величинам напряжений одного знака позволил оценить чувствительность метода к изгибной составляющей. Отверстие диаме-

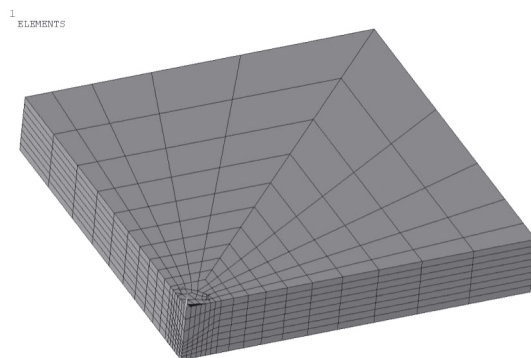


Рис. 5. Конечно-элементная модель (1/4 часть рассматриваемой области пластины)

тром $d=2\rho=3$ мм наращивалось по глубине в два этапа с шагами $t_1=1,2$ мм; $t_2=3$ мм. Схема сеточного разбиения рассматриваемой области приведена на рис. 5.

В качестве измеряемых параметров деформационного отклика, обусловленного сверлением отверстия, рассматривались поля тангенциальных перемещений u, v , зарегистрированные методом ЭЦСИ в области $1,2 \leq |\bar{r}|/\rho \leq 3,0$.

Так же, как и в первом из рассмотренных примеров, проводилось исследование влияния условий решения на его сходимость при средне-квадратическом и максимальном отклонениях.

Из приведенных в табл. 2 результатов следует, что норма $I_{\max}$ дает несколько меньший разброс значений, чем I_{RMS} . Математическое ожидание вычисляемых параметров имеет отклонение от истинных значений в пределах погрешности решения обратной задачи (не превышающей 1%). При $\delta=10\%$ и $N=42$ использовании нормы $I_{\max}$ дисперсия найденных величин параметров $\bar{\sigma}_1^H, \bar{\sigma}_2^H, \bar{\sigma}_1^B, \bar{\sigma}_2^B$ не превышает 5%. Увеличение количества точек измерений N может привести к уменьшению погрешности результатов. В частности, проведенные оценки показали, что

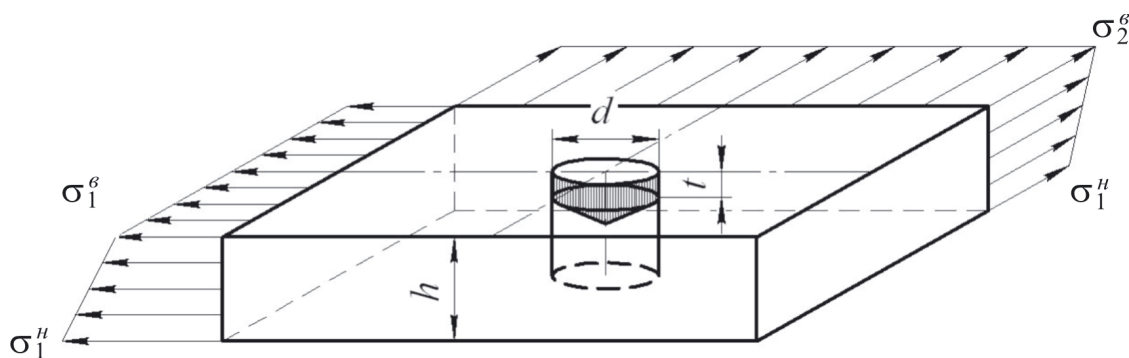


Рис. 4. Расчетная схема задачи

(напряжения на передней и правой гранях не показаны): h – толщина пластины; d, t – диаметр и глубина отверстия, соответственно; $\sigma_1^H, \sigma_2^H, \sigma_1^B, \sigma_2^B$ – параметры напряженного состояния

если принять $N \geq 100$, то даже при $\delta = 20\%$ дисперсия искомых параметров составляет $\sim 5\%$. Заметим, что увеличение количества точек измерений не представляет сложностей и может быть сделано автоматически с помощью программы обработки интерференционных картин.

Результаты решения модельной задачи позволяют сделать вывод о достаточной точности определения искомых параметров. Заметим, что эти выводы в полной мере можно распространить и на решение задачи о линейном распределении напряжений по глубине полупространства или определении остаточных напряжений методом «слепого» отверстия [4].

Заключение

Таким образом, предлагаемая методика реализована в виде единого программного продукта, основанного на постоянном взаимодействии ПК *ANSYS* и *MATLAB* при решении обратной задачи. Комплекс разработанных (основных и вспомогательных) программ позволяет автоматизировать все этапы решения задачи: от указания мест локализации выбранных точек на полях деформационного отклика, величин их перемещений (получаемых методом ЭЦСИ) или разностей главных напряжений (получаемых методом фотоупругих покрытий), до проверки правильности задания расчетной модели и адекватности получаемых в ходе решения задачи результатов (на основе сопоставления интерференционных картин, соответствующих найденным расчетным значениям P_j с экспериментально полученными). При этом предусмотрена возможность ввода экспериментальной информации – интерференционных картин, непосредственно с экрана дисплея в интерактивном режиме.

На данный момент программный комплекс позволяет реализовывать методы «отверстия» и «трещины» для определения полей механических напряжений с неоднородным распределением по глубине в натурных конструкциях и лабораторных образцах, соответственно. Главным образом речь идет о статически нагруженных объектах, когда имеется возможность проведения всего спектра работ по получению экспериментальной информации.

Дальнейшее развитие предлагаемой методологии (и соответствующее расширение возможностей программного комплекса), в первую очередь, предусматривает:

- определение параметров нагруженности натуральных конструкций при наличии пластических деформаций благодаря возможности учета в МКЭ реальных свойств материалов;
- методы определения деформационных характеристик материалов. Необходимые доработки программы практически сводятся лишь к смене параметров поиска. В перспективе видится использование методики в сочетании с «отверстием» для изучения временного изменения (деградации) свойств материалов конструкций, в том числе и при неизвестной нагруженности объекта;
- методы определения неоднородных полей остаточных напряжений в пространственных элементах конструкций, в том числе и по глубине пространственной детали на основе применения более сложных моделей распределения параметров нагруженности.

Список литературы

1. Gloud G.L. Optical Methods in Engineering Analyses. – Cambridge: Univ. Press, 1998. – 503 p.
2. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела: учеб. пособ. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 240 с.
3. Одинцев И.Н. Метод испытания анизотропных материалов в трансформируемых схемах нагружения // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. трудов XIV Международ. науч.-техн. конф. Севастополь, 17–22 сентября 2007. Т. 3. – Донецк: ДНТУ, 2007. С. 114–118.
4. Экспериментальная механика / Под ред. А. Кобаяси: пер. с англ. В 2 т. Т. 2. – М.: Мир, 1990. – 551 с.
5. Разумовский И.А. Определение коэффициентов интенсивности напряжений K_I , K_{II} и K_{III} поляризационно-оптическими методами в однородных и кусочно-однородных деталях и образцах с трещинами // Заводская лаборатория. 1988. № 10. С. 58–64.
6. Razumovsky I.A., Medvedev M.V., Fomin A.V. Methods for Investigations Inhomogeneous Residual Stresses Fields. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel / Ed.: G. Totten, M. Howes, T. Unoue. – ASM International, USA, 2002. P. 125–138.
7. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченкова Н.В. Вычислительные методы для инженеров:

- учеб. пособ. – М.: Высшая школа, 1994. – 554 с.
8. Разумовский И.А., Чернятин А.С. Экспериментально-расчетный метод оценки нагруженности натурных конструкций с поверхностными трещинами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 3. С. 35–42.
9. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упруго-пластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 502 с.
10. Черепанов Г.П. Механика разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
11. Механика разрушения и прочность материалов / Под ред. В.В. Панасюка. В 4-х т. Т. 2. – Киев: Наукова думка, 1988. – 619 с.
12. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86. – М.: Энерг-атомиздат, 1989. – 523 с.

**РАЗУМОВСКИЙ
Игорь
Александрович**

E-mail:
razumovsky@mtu-net.ru
Тел. +7 (499) 135-62-98

Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Область научных интересов: экспериментальные и экспериментально-расчетные методы исследования напряженно деформированного состояния с использованием оптико-интерференционных методов; механика разрушения, методы анализа полей остаточных напряжений; прочность и трещиностойкость многослойных конструкций. Автор более 100 научных трудов, монографии и соавтор ряда коллективных монографий.

**ЧЕРНЯТИН
Александр
Сергеевич**

E-mail: **cas@inbox.ru**
Тел. +7 (499) 263-69-88

Ассистент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: расчетные и экспериментально-расчетные методы исследования напряженно- деформированного состояния, методы анализа полей остаточных напряжений. Автор 6 научных публикаций.

Материал поступил в редакцию 02.09.2009