

УДК 539.3(075.8)+539.421

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ПОВЕРХНОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ

А. С. Чернятин, И. А. Разумовский

В статье изложена методика комплексного анализа зон поверхностных трещин в конструкциях, заключающаяся в одновременном определении реальных нагрузок, геометрии трещины, а также распределения параметров механики разрушения по ее фронту. Метод основан на определении искомых параметров из условия минимума целевой функции, отражающей расхождение значительных массивов экспериментальных данных и результатов расчетов модельных задач на основе МКЭ. В качестве исходной экспериментальной информации используется деформационный отклик, возникающий вследствие высверливания малого отверстия в вершине трещины. Эффективность метода и соответствующего вычислительного комплекса иллюстрируется результатами решения модельных задач.

Ключевые слова: механика разрушения, нагруженность, трещина, экспериментальные методы анализа деформированного состояния, метод конечных элементов.

Введение

Одной из главных тенденций развития методов оценки прочности и ресурса конструкций современной техники, работающей в экстремальных эксплуатационных условиях, является активное применение механики разрушения, и, в частности, методов анализа процесса развития трещин в материале конструкции. При этом необходимой составляющей исследования сопротивления материала хрупкому разрушению является анализ нагруженности зоны трещины, а также размеров трещин.

Заметим, что величины и даже характер истинных нагрузок могут существенно отличаться от их расчетных значений, причем не только из-за всегда имеющих место погрешностей расчетной схемы, но и наличия начальных (сборочных) и остаточных напряжений, а также возникновения дополнительных усилий, обусловленных подвижками опорных конструкций. Для исследования остаточных (активных) напряжений широкое применение нашел метод отверстия в сочетании с различными методами регистрации деформационных откликов.

Однако он имеет значительные ограничения по применению, обусловленные типом принимаемой модели.

Кроме того, исследование объекта в области с трещиной невозможно без информации о геометрии трещины, определение которой на практике представляет собой достаточно сложную задачу. Довольно часто при расчетах геометрия трещины принимается в соответствии с известными теоретическими результатами или установленными нормативными документами.

Также следует отметить, что в процессе эксплуатации в отдельных элементах могут возникать существенные локальные изменения их формы, связанные с пластическими деформациями и деформациями ползучести, а также износом.

Указанные обстоятельства наряду с постоянно повышающимися требованиями к обеспечению прочности и надежности современных конструкций обуславливают необходимость разработки методов и средств эксплуатационного контроля напряженно-деформированного

состояния (НДС) натуральных конструкций, имеющих дефекты типа трещин.

В данной работе предлагается комплексный анализ зоны натурального объекта с выходящей на поверхность трещиной, что позволяет исследовать не только нагруженность натуральных конструкций [1–3], но и уточнять геометрию трещин (определять ее глубину). В такой постановке задача рассматривается впервые.

Постановка задачи

Под комплексным анализом зоны натурального объекта с выходящей на поверхность трещиной (внутренней или сквозной) будем подразумевать методику одновременного определения:

- параметров, характеризующих общую нагруженность зоны повреждения материала (окрестности зоны трещины);
- геометрических параметров трещины;
- распределения параметров механики разрушения (коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) или J -интеграла) по фронту трещины.

В качестве объекта исследования могут рассматриваться конструкции различного типа.

Знание в совокупности, различных по типу параметров, характеризующих зону конструкции с трещиной, может быть положено в основу уточненной оценки трещиностойкости.

Осуществление комплексного анализа возможно с помощью подхода, предложенного в работе [1] для оценки величин макронапряжений, имеющих место в зоне натурной конструкции с поверхностной трещиной (с известной геометрией). Метод основан на обработке результатов измерений деформационного отклика, возникающего при высверливании отверстия в зоне вершины трещины. При этом, с одной стороны, реализуется известный способ конструкционного торможения поверхностных трещин, позволяющий снизить концентрацию напряжений и устранить наиболее поврежденный материал в кончике трещины [4], а с другой – производится оценка нагруженности соответствующей области конструкции.

Разработанный авторами экспериментально-расчетный метод [1–3], на основе которого осуществляется решение указанной задачи, позволяет в качестве определяемых параметров системы P_j использовать не только нагрузки, но также и геометрические размеры и (или) механические характеристики мате-

риалов. Данный метод заключается в подборе истинных величин параметров P_j из условия минимума целевой функции I , комплексно отражающей расхождение значительных массивов экспериментальных e_i^* и расчетных e_i данных. Последние, представляющие собой величины деформационных откликов в точках измерений, определяются как результат решения прямой задачи, который с привлечением метода конечных элементов (МКЭ) можно получить в самой общей постановке при текущих значениях искомым параметров P_j . Массив экспериментальных данных формируется на основе применения современных экспериментальных методов регистрации полей перемещений (электронная цифровая спекл-интерферометрия – ЭЦСИ) или деформаций (метод фотоупругих покрытий), обеспечивающих получение практически неограниченного объема информации [5].

Задача данной работы состоит в проверке возможности проведения комплексного анализа области с трещиной на основе применения предлагаемого подхода, а также в отработке методических вопросов проведения исследований. Для этого был выполнен численный эксперимент, в процессе которого искомые параметры, характеризующие нагруженность области и геометрию трещины, определялись на основе обработки деформационного отклика (полей перемещений), обусловленного высверливанием в вершине трещины малого «глухого» отверстия.

Цель численного эксперимента – оценить точность получаемых результатов с учетом погрешности экспериментальной информации.

Компьютерная реализация методики

В разработанном вычислительном комплексе [2, 3], реализующем указанный экспериментально-расчетный метод, предусмотрена возможность в качестве определяемых величин рассматривать коррелированные между собой параметры, характеризующие как НДС, так и геометрические параметры рассматриваемого объекта.

Отметим ключевые моменты реализации указанного метода вычислительным комплексом.

Решение прямой задачи, заключающейся в расчете деформационных откликов e_i при за-

данных текущих значениях параметров системы P_j , потребовало разработки универсальных параметрических макросов, написанных на языке *APDL* [6] для среды *ANSYS*, которые в автоматическом режиме обеспечивают:

- возможность генерации сетки конечных элементов, описывающей область конструкции в виде призматического тела с различными геометрическими особенностями и реальными свойствами материалов;
- создание в конечно-элементной модели свободно ориентированной в пространстве плоской трещины с произвольной геометрией фронта и упорядоченной сеткой сингулярных элементов вдоль него;
- возможность наложения кинематических и силовых граничных условий как к границам трехмерной области, внутри которой расположена трещина, так и к поверхностям образуемых отверстий;
- расчет распределения параметров хрупкого разрушения по фронту трещины.

Для подготовки исходных данных и управления процессом решения обратной задачи, заключающейся в определении искомых параметров P_j на основе математической обработки экспериментальных полей деформационных откликов (массива e_i^*), применяется ряд разработанных авторами в среде *MATLAB* программ с графическим интерфейсом [7], позволяющих:

- формировать большие массивы данных e_i^* на основе экспериментально полученных картин полей деформационных откликов;
- проводить расчет НДС и определять величины откликов e_p , соответствующих экспериментальным данным;

– выполнять (на основе решения задачи минимизации) расчет искомых параметров и производить оценку влияния различных факторов (погрешности экспериментов, количества и локализации точек измерений, величин начальных оценок параметров и пр.) на точность решения.

Работа вычислительного комплекса основана на использовании специального алгоритма непрерывного взаимного обмена данными между средами *MATLAB* и *ANSYS*, обеспечивающего возможность полной автоматизации решения задачи [2, 3].

Постановка численного эксперимента

В качестве модельной задачи рассматривалось упругое полупространство с поверхностной полуэллиптической трещиной (рис. 1, а), нагруженное на удалении от зоны трещинообразования двухосным однородным полем напряжений: при $x \rightarrow \infty$ $\sigma_x = 100$ МПа, $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$; при $y \rightarrow \infty$ $\sigma_y = 200$ МПа, $\sigma_x = \tau_{xy} = 0$. Размер полуэллиптической трещины на поверхности конструкции $2a = 20$ мм, ее глубина $b = (2/3)a = 6,67$ мм, диаметр и глубина зондирующего отверстия $d = t = 2$ мм соответственно, угол развертки вершины отверстия $\alpha = 120^\circ$. Полупространство выполнено из конструкционной стали с модулем Юнга $E = 2 \cdot 10^5$ МПа и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,3$.

Была построена конечно-элементная модель полупространства в виде призматического тела конечных размеров, включающая в себя полость трещины с упорядоченной сеткой сингулярных элементов вдоль фронта и объем зондирующего отверстия (рис. 1, б). Отметим, что стандартные

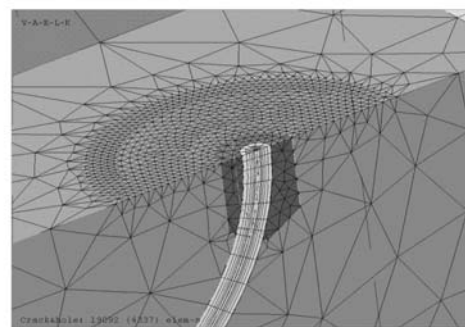
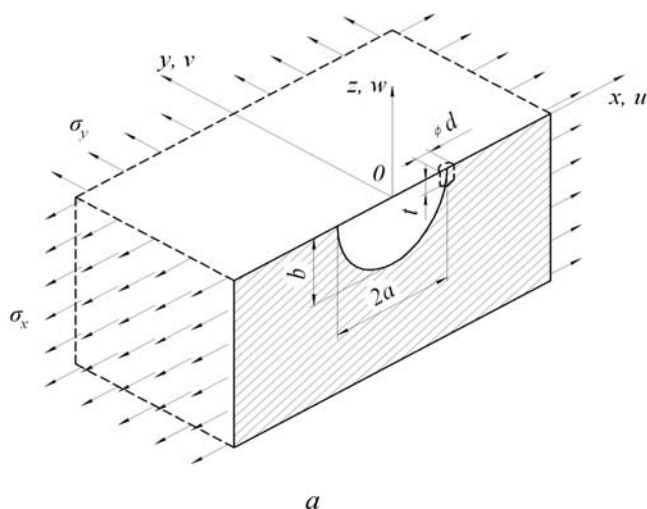


Рис. 1. Нагруженное полупространство с полуэллиптической трещиной (а) и конечно-элементная модель области выхода трещины на поверхность (б)

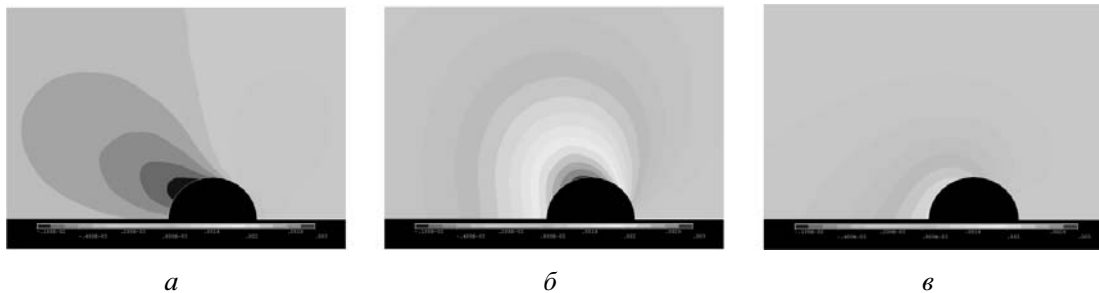


Рис. 2. Поля перемещений u (а), v (б), w (в), обусловленные образованием отверстия в вершине трещины

процедуры программной среды *ANSYS* не позволили бы встроить трещину в данную область, так как ее фронт пересекает несколько объемов.

В результате решения прямой задачи о расчете НДС, обусловленного образованием отверстия в вершине трещины, были получены поля тангенциальных (u , v) и нормальных (w) перемещений (рис. 2), аналоги которых на практике могут быть найдены с использованием метода ЭЦСИ. Заметим, что для регистрации трех компонент вектора перемещений точек поверхности объекта можно использовать специализированную ЭЦСИ-установку, разработанную для исследования остаточных напряжений способом сверления отверстия [8]. При расчете деформационного отклика считалось, что для регистрации интерференционных картин используется твердотельный лазер с длиной волны $\lambda=0,532$ мкм (соответственно цена деления на полосе интерференции при регистрации нормальных перемещений w составляет 0,266 мкм).

Полученные поля перемещений u , v , w использованы в качестве исходной экспериментальной информации, на основе которой определялись параметры системы: $P_j = \{b, \sigma_x, \sigma_y\}$.

Формирование массива исходных данных

На первом этапе строят линии-сплайны, соответствующие интерференционным полосам [5] $u=\text{const}$, $v=\text{const}$, $w=\text{const}$ картин перемещений.

Затем в автоматическом режиме выполняются следующие функции:

- на построенных изолиниях обозначаются точки измерения с заданным распределением вдоль них;
- проводится расчет координат точек измерения в системе координат конечно-элементной модели;
- определяются величины соответствующи-

щих деформационных откликов e_i^* в рассматриваемых точках измерений на основе исходной конечно-элементной модели полупространства.

Полученный массив e_i^* является исходной информацией для расчета параметров P_j по указанной методике [1, 2], основанной на сопоставлении экспериментальных и численных данных.

Процедура решения прямой задачи

С целью ускорения процесса минимизации, где на каждом шаге итерационного процесса (при текущих значениях искомых параметров P_j) необходимо в выбранных точках измерений вычислять величины откликов e_i (соответствующих откликам e_i^*), создается так называемый дискретно-континуальный банк откликов [2]. Для этого были построены три конечно-элементные модели, различающиеся глубиной трещины (рис. 3): $b_j = \{3,33; 6,67; 10,0\}$ и имеющие подобные сетки конечных элементов. Для этих моделей в автоматическом режиме была проведена серия расчетов НДС, обусловленного образованием одного и того же отверстия, но

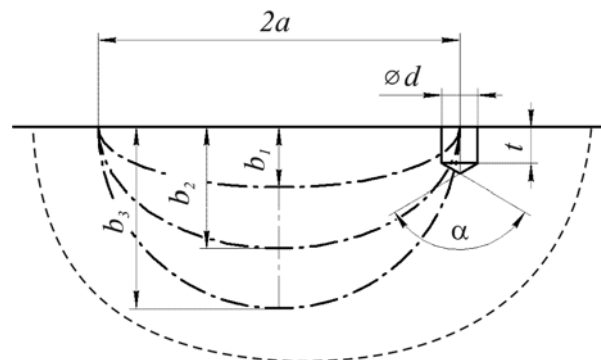


Рис. 3. Конфигурация плоских полуэллиптических трещин, соответствующих трем рассмотренным значениям глубины

при различных значениях искомых параметров b, σ_x, σ_y . При этом значения параметра b соответствовали элементам вектора b_p , а значения параметров σ_x, σ_y поочередно принимались $\sigma_x^1=1, \sigma_y^1=0$ и $\sigma_x^1=0, \sigma_y^1=1$. В результате для каждой точки измерения формируется матрица:

$$\Delta_i^{l,m} = \begin{bmatrix} \Delta_i^{1,1} & \Delta_i^{1,2} \\ \Delta_i^{2,1} & \Delta_i^{2,2} \\ \Delta_i^{3,1} & \Delta_i^{3,2} \end{bmatrix},$$

где $\Delta_i^{l,m}$ – деформационный отклик системы, соответствующий e_p , но полученный при текущей комбинации значений параметров:

$$P_j^{l,m} = \{b_p, \sigma_x^m, \sigma_y^m\} \quad (l=1, 2, 3; m=1, 2).$$

Для каждого столбца матрицы $\Delta_i^{l,m}$ была получена интерполирующая функция $\Delta F_i^m(b)$, устанавливающая взаимосвязь между откликом Δ_i при значениях параметров σ_x^m, σ_y^m и произвольной величиной параметра b . Совокупность коэффициентов, определяющих две ($m=1, 2$) интерполирующие функции для каждого e_p , образуют дискретно-континуальный банк откликов, с использованием которого величины соответствующих деформационных откликов при произвольных значениях параметров P_j могут быть вычислены следующим образом:

$$e_i = f(b, \sigma_x, \sigma_y) = \Delta F_i^1(b) \sigma_x + \Delta F_i^2(b) \sigma_y.$$

Определение искомых параметров и оценка точности результатов

При решении обратной задачи, заключающейся в определении параметров P_j на основе обработки исходных «экспериментальных» данных e_i^* , организуется итерационный процесс решения задачи минимизации, на каждом шаге которого уточняются значения параметров P_j . Значения параметров $P_j = P_j^*$, при которых целевая функция $I(e_i^*, e_i)$ достигает минимума, считаются решением задачи. В качестве целевых функций принимаются среднеквадратичное I_{RMS} или максимальное I_{max} отклонение расчетных значений перемещений e_i от соответствующих экспериментальных данных e_i^* . Процедура поиска минимума целевой функции основана на методе деформированного многогранника (метод деформируемых симплекс-элементов Нелдера – Мида) [9], нашедшем широкое применение на практике.

На первом этапе исследования считалось, что погрешность экспериментальных данных δ_e отсутствует, а начальные оценки искомых параметров $P_j^0 = \{1; 50; 50\}$ существенно отличаются от их точных значений. Результаты решения обратной задачи, полученные при использовании целевых функций I_{RMS}, I_{max} (рис. 4), практически совпадают с их реальными величинами

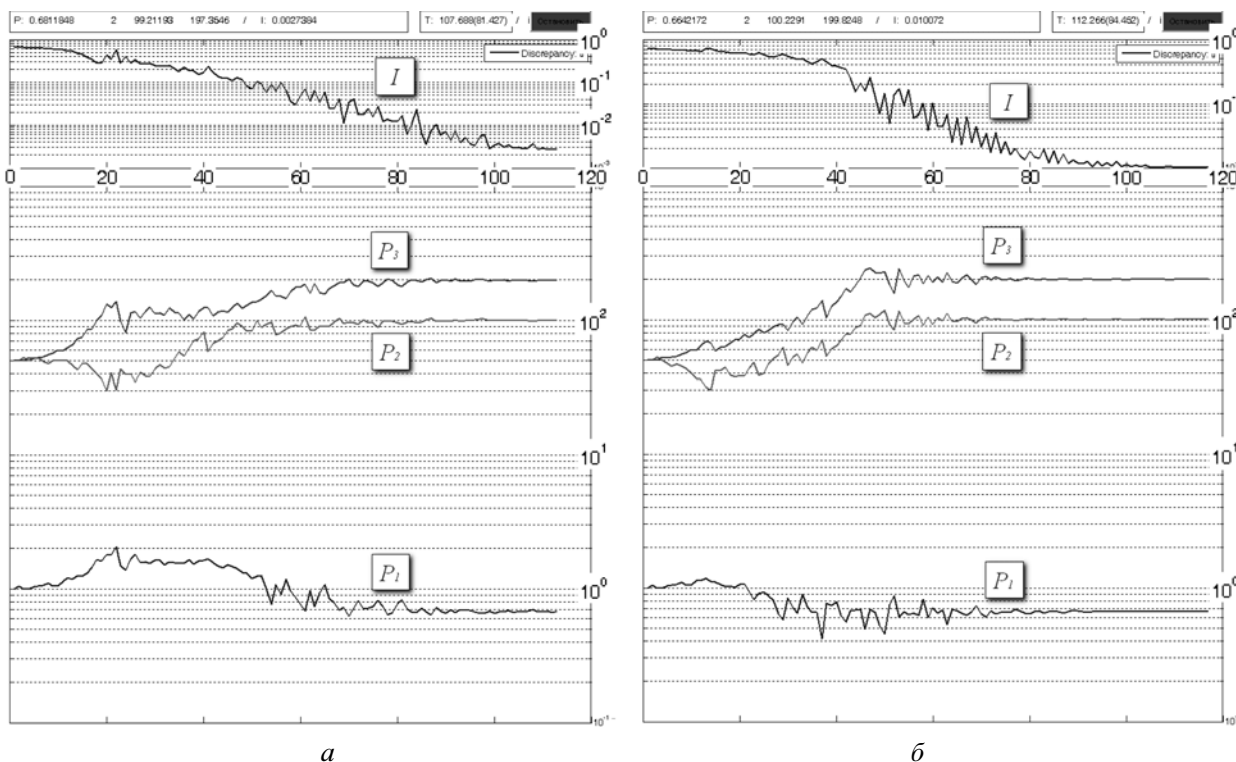


Рис. 4. Изменение значений целевых функций $I=I_{RMS}$ (а), $I=I_{max}$ (б) и искомых параметров P_j в процессе решения задачи минимизации

$b^*, \sigma_x^*, \sigma_y^*$, указанными в постановке эксперимента, – погрешность результатов не превышает 0,1 %.

Далее для исследования устойчивости полученного решения, а также оценки чувствительности процедуры к погрешности экспериментальных данных была проведена серия численных экспериментов по определению параметров P_j при различных условиях. Варьировались: диапазон разброса отклонений (погрешностей) экспериментальных данных δ_e , количество точек измерений N , а также зона их локализации (определяется границами значений безразмерного радиус-вектора точек измерений r/ρ , исходящего из центра отверстия радиусом $\rho=d/2$). Отметим, что для каждой конкретной задачи (сочетание I, N, δ_e) проводилось по 100 расчетов искомых параметров, и для каждого расчета в значения «экспериментально» полученных деформационных откликов e_i^* вносились отклонения, величины которых генерировались датчиком случайных чисел (в интервале $[-\delta_e, +\delta_e]$). В качестве «нулевого» приближения P_j^0 принимались значения параметров с погрешностью не более, чем 50 % от заданных, которые также для каждого расчета генерировались датчиком случайных чисел. В результате проведенных расчетов для каждого варианта задачи были получены гистограммы распределения решений искомых параметров

(рис. 5) и определены математическое ожидание и дисперсия безразмерных параметров $\bar{b} = b/b^*, \bar{\sigma}_x = \sigma_x/\sigma_x^*, \bar{\sigma}_y = \sigma_y/\sigma_y^*$.

Основные результаты численных экспериментов представлены в таблице. Заметим, что при выборе условий для каждой новой задачи учитывались результаты предыдущей. На основе их анализа можно сформулировать требования, при выполнении которых обеспечивается достаточная для практики точность определения искомых параметров. В частности, результаты расчетов 1–4 (см. таблицу), полученные при $N = 55$ и $\delta_e = 10\%$, показывают, что минимальная погрешность результатов имеет место при локализации точек в области $2,0 \leq r/\rho \leq 3,0$ – независимо от выбора целевой функций. Можно отметить, что во всех указанных случаях отклонение математического ожидания найденных параметров от их истинных значений не превышает 1,3 %. При этом целевой функции I_{RMS} соответствует дисперсия, не превышающая 8,1 %, что значительно меньше, чем при использовании целевой функции I_{max} . Увеличение количества точек измерений в 2 раза (расчет 5) приводит к уменьшению погрешности определения параметров и разброса их значений: отклонение математического ожидания не превышает 0,8 %, а дисперсия составляет 5,1 %. При $\delta_e = 20\%$ (расчет 6) относительные отклонения математического ожидания парамет-

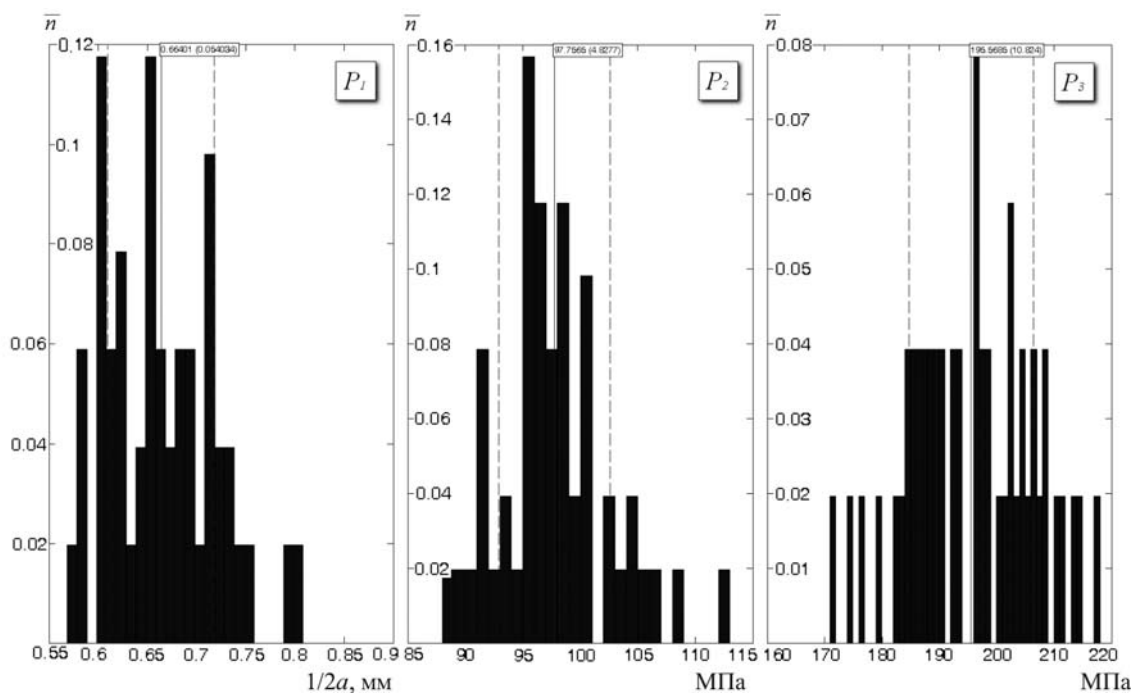


Рис. 5. Примеры гистограмм разброса значений искомых параметров: b (а), σ_x (б), σ_y (в), полученных при $\delta_e = 20\%$, $N = 60$, $I = I_{RMS}$

Оценка влияния погрешности условий экспериментального исследования на величины искомых параметров

	Условия				Математическое ожидание			Дисперсия		
Номер п/п	Локализация точек	N	$\delta_e, \%$	I	$\bar{b}$	$\overline{\sigma_x}$	$\overline{\sigma_y}$	$\bar{b}$	$\overline{\sigma_x}$	$\overline{\sigma_y}$
1	$2,0 \leq r / \rho \leq 3,0$	55	10	I_{RMS}	1,013	0,998	0,988	0,081	0,036	0,049
2				I_{max}	1,010	0,996	0,988	0,109	0,061	0,067
3	$1,0 \leq r / \rho \leq 2,0$			I_{RMS}	1,049	0,994	0,982	0,216	0,091	0,116
4				I_{max}	1.075	0,989	0,975	0,262	0,093	0,128
5	$2,0 \leq r / \rho \leq 3,0$	110	10	I_{RMS}	1,003	0,992	0,992	0,051	0,023	0,030
6			20	I_{RMS}	1,030	0,970	0,959	0,124	0,055	0,071
7				I_{max}	1,054	0.093	0,932	0,097	0,040	0,055
8			60	20	I_{RMS}	0,996	0,978	0,078	0,081	0,048

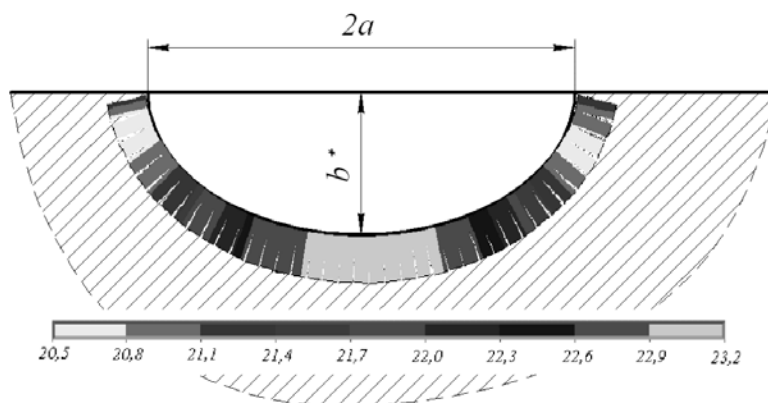


Рис. 6. Эюра распределения K_I (МПа·м^{1/2}) вдоль фронта трещины для случая, соответствующего найденным значениям параметров: $\sigma_x=100$ МПа, $\sigma_y=200$ МПа, $b=6,67$ мм; $2a=20$ мм

тров не превышают 4,1 %, а дисперсия составляет 12,4 %.

Расчет коэффициентов интенсивности напряжений

Следующим этапом комплексного анализа поврежденной области конструкции является расчет НДС и распределения параметров механики разрушения по фронту трещины на основе полученных данных о размерах трещины и действующих в поврежденной зоне нагрузках (напряжениях). Для вычислительного комплекса разработан специальный макрос, позволяющий определить коэффициенты интенсивности напряжений трех типов или J -интеграл вдоль всего фронта трещины на основе известных в механике разрушения подходов с использованием МКЭ [4, 10, 11].

Распределение КИН первого типа K_I – рас-

пределение по фронту трещины (при отсутствии зондирующего отверстия), полученное с использованием разработанного макроса, представлено на рис. 6.

Заключение

Анализ результатов проведенных численных экспериментов свидетельствует о том, что предлагаемый подход и разработанный вычислительный комплекс дают возможность определения различных по типу параметров, характеризующих текущее состояние области конструкции с трещиной, на основе обработки деформационных полей, возникающих при выполнении известного технологического способа останова роста трещины. В свою очередь, найденные параметры могут стать основой для уточненной оценки трещиностойкости соответствующего элемента конструкции.

Результаты расчетов позволяют сформулировать требования к условиям проведения экспериментальных исследований, при выполнении которых обеспечивается достаточная для практического применения достоверность получаемых параметров. В частности, даже при 20 %-ной погрешности исходных данных удалось определить силовые параметры с погрешностью 10 %, а геометрические – с погрешностью 15 %. В связи с этим можно сделать вывод о перспективности практического применения предложенного метода.

Дальнейшим шагом в развитии метода может стать учет пластического поведения материала в вершине трещины, существенно изменяющихся по глубине детали полей макронапряжений, а также более сложной геометрии самой трещины.

Список литературы

1. Чернятин А.С. К методу оценки нагруженности конструкций с поверхностной трещиной путем высверливания малого отверстия в ее вершине // Тез. докл. XVII Междунар. интернет-конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2005). М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2005. С. 229.
2. Разумовский И.А., Чернятин А.С. Методология и программа для исследования напряженно-деформированного состояния с использованием интерференционно-оптических и численных методов // Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 4. С. 42–51.
3. Chernyatin A., Razumovsky I. Experimental and computational method for determining parameters of stress-strain state from the data obtainable by interference optical techniques // Proc. ICEM-14. Poitiers, France, 4–9 July, 2010: EPJ Web of Conferences **6**, 45003 (2010). – Режим доступа: http://www.epj-conferences.org/index.php?option=com_toc&url=/articles/epjconf/abs/2010/05/contents/contents.html (дата обращения: 02.02.2011).
4. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 502 с.
5. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 237 с.
6. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
7. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
8. Апальков А.А., Одинцев И.Н., Разумовский И.А. Применение электронной спекл-интерферометрии для измерения остаточных напряжений. Сообщение 3: случай глухого зондирующего отверстия // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69. № 2. С. 45–49.
9. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченкова Н.В. Вычислительные методы для инженеров. – М.: Высшая школа, 1994. – 543 с.
10. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. – М.: Наука, 1980. – 256 с.
11. Морозов Е.М., Муземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. – М.: ЛЕНАНД, 2008. – 456 с.

Материал поступил в редакцию 17.02.2011

ЧЕРНЯТИН Александр Сергеевич

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

Ассистент кафедры прикладной механики МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов – расчетные и экспериментально-расчетные методы исследования напряженно-деформированного состояния, методы анализа полей остаточных напряжений. Автор 10 научных публикаций.

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.