

УДК 51-7

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАГРУЖЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ С ПОВЕРХНОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ

© И.А. Разумовский¹⁾, А.С. Чернятин²⁾

¹⁾ Институт машиноведения РАН, Россия, Москва

²⁾ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва

Аннотация. С целью определения эффективности практического применения метода оценки нагруженности конструкций с поверхностной трещиной путём высверливания малого отверстия в её вершинах были проведены расчёты серии модельных задач с использованием метода конечных элементов.

Ключевые слова: натурная конструкция, концентрации напряжений, метод конечных напряжений.

Известен способ конструкционного торможения поверхностных трещин, возникающих при эксплуатации конструкций самых различных типов, заключающийся в высверливании в зоне вершины трещины малого отверстия. Эффективность этого подхода определяется рядом факторов, основным из которых является снижение концентрации напряжений и устранение их сингулярности, а также устранение наиболее повреждённого металла в кончике трещины [1].

В работе [2] предложено проводить оценку величин макронапряжений, имеющих место в соответствующей зоне натурной конструкции, на основе обработки результатов измерений деформационного отклика, возникающего при выполнении указанной технологической операции. При этом считается, что в пределах области, существенно превышающей размеры трещины, имеет место однородное напряжённо-деформированное состояние. Найденные таким образом напряжения будут свидетельствовать об истинной нагруженности рассматриваемой зоны конструкции, включая как активные нагрузки, так и начальные напряжения. Заметим, что их можно использовать в качестве силовых граничных условий для исследования дальнейшего поведения трещины.

С целью оценки эффективности практического применения указанного подхода были проведены расчёты серии модельных задач с использованием метода конечных элементов МКЭ (ПК ANSYS). Среди них: пластина неограниченных размеров с математическим разрезом, находящаяся в условиях одноосного растяжения или изгиба, полупространство с эллиптической трещиной под действием одноосного растяжения, раскрывающего трещину. В указанных телах в вершине трещины «высверливалось» малое отверстие, в окрестности которого на свободной поверхности определялись величины перемещений, возникающих после сверления отверстия. Обобщая их результаты, можно сделать следующий вывод: в стальных конструкциях с трещинами длиной $l \sim 25$ мм и номинальных напряжениях ~ 100 МПа при высверливании отверстия диаметром $2\rho \sim 2 \div 3$ мм максимальные перемещения в зоне отверстия имеют величины от 1 до 5 мкм и более (рис. 1).

Отсюда следует, что на практике для регистрации деформационного отклика, получаемого при сверлении отверстия, целесообразно применять метод электронной цифровой спектр – интерферометрии (ЭЦСИ), обеспечивающий возможность бесконтактной регистрации полей перемещений с чувствительностью $\sim 0,3$ мкм на полосу интерференции. Специалистами Института машиноведения на базе ЭЦСИ-интерферометра разработана компактная мобильная установка для регистрации деформационного отклика (полей тангенциальных перемещений), обусловленных сверлением отверстий в натуральных объектах.

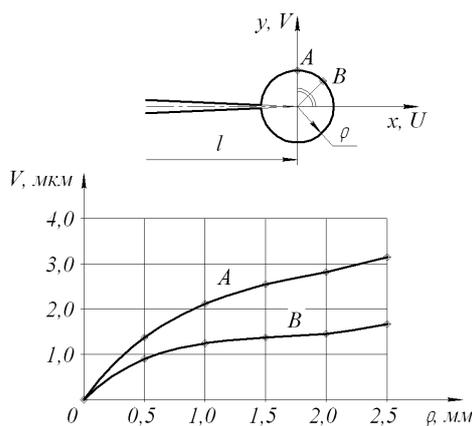


Рис. 1. Результаты расчётов модельной задачи для трещины в растягиваемой пластине.

При выполнении данного этапа основное внимание было уделено вопросам построения конечно-элементных моделей и организации вычислительного процесса. С этой целью в ПК ANSYS на языке APDL были разработаны специализированные программы и макросы, обеспечивающие:

- параметрическое моделирование исследуемых (типичных) областей (объектов);
- автоматическое построение в рассматриваемом объекте поверхностных пространственных плоских трещин с произвольно задаваемой геометрией фронта и отверстий;
- поведение расчётов соответствующих краевых задач.

Были рассмотрены вопросы оптимального разбиения тела на конечные элементы в вершине трещины с использованием сингулярных элементов (рис. 2), а также выбора оптимальных процедур построения параметрических конечно-элементных моделей и их рациональностью.

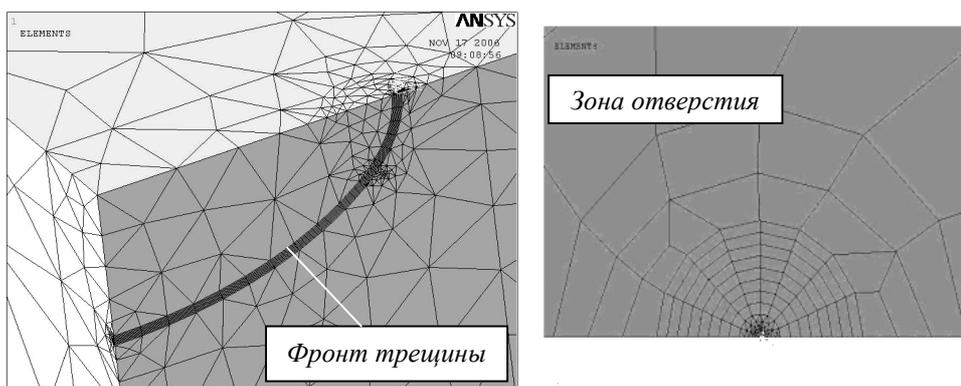


Рис. 2. Схема сеточного разбиения полупространства с полуэллиптической трещиной и области около отверстия

Поставленная задача относится к классу обратных, где известными величинами являются параметры деформационного отклика на изменение НДС, обусловленное сверлением отверстия внутри области, при неизвестных силовых граничных условиях (напряжениях) на поверхностях сечений, являющихся условными границами выбранной области. Предлагаемое решение задачи основывается на минимизации целевой функции – *среднеквадратичного отклонения* экспериментально определяемых перемещений в N точках

(точках регистрации данных эксперимента) на поверхности исследуемой области от их расчётных значений, получаемых в результате решения прямой задачи. При отыскании функции варьировались значения параметров внешней нагрузки в прямой задаче (искомые напряжения на границе области). Проводились также численные эксперименты, в которых в качестве целевой функции также принималось *максимальное отклонение* расчётных значений перемещений от экспериментальных данных.

Процедура поиска минимума целевой функции базировалась на методе деформируемых симплекс - элементов (метод Нелдера - Мида), реализованном в ПК MATLAB. Решение краевой задачи механики деформированного твёрдого тела в одном ПК (ANSYS) и реализация алгоритма минимизации целевой функции – в другом ПК (MATLAB) стало возможным благодаря разработке специального алгоритма и написания соответствующих программ, осуществляющих совместный непрерывный обмен данными между указанными программными комплексами. Таким образом, предлагаемая методика реализована в виде единого программного продукта, основанного на постоянном взаимодействии ПК ANSYS и MATLAB в ходе решения обратной задачи. Комплекс разработанных программ позволяет автоматизировать все этапы решения прикладной задачи: от указания мест локализации выбранных точек, величин перемещений, получаемых методом ЭЦСИ, до проверки адекватности получаемых результатов в ходе решения обратной задачи; при этом предусмотрена возможность ввода экспериментальной информации – интерференционных картин, характеризующих поля перемещений на поверхности исследуемого объекта, непосредственно с экрана дисплея в интерактивном режиме.

При определении параметров деформационного отклика всегда имеет место экспериментальная погрешность. В связи с этим было проведено исследование влияния на величины искомых напряжений (нагрузок) следующих факторов:

- разброса значений экспериментально определяемых перемещений, обусловленных высверливанием отверстия в нагруженной конструкции;
- количества и локализации точек измерений.

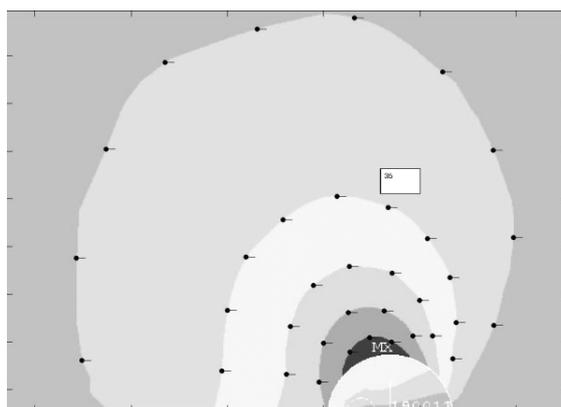


Рис. 3. «Интерференционная» картина перемещений V , полученная при расчётном решении модельной задачи

Для этих целей проводился численный эксперимент, заключающийся в следующем: решалась прямая модельная задача при заданных граничных условиях (нагрузках), на основе результатов решения которой определялись величины перемещений в N точках, расположенных на линиях равных перемещений (соответствующих интерференционным картинам, получаемым экспериментально, рис. 3). Затем в эти значения вносилась

погрешность, генерируемая случайным образом для каждой точки и не превышающая определённого значения ($\delta = 5, 10, 15\%$). Именно эти данные рассматривались в качестве исходной информации для решения обратной задачи. Специальная организация вычислительной процедуры (путём создания своего рода базы данных податливостей для каждой точки измерения) позволила на каждую постановку численного эксперимента делать по 100 просчётов обратной задачи. В итоге строились гистограммы, описывающие разброс результатов решения при каждом, заданном случайным образом, в принятых пределах отклонении исходных данных (рис. 4).

На основе полученных результатов были сформулированы условия, при которых обеспечивается достаточная для практики точность определения искомых параметров нагруженности конструкции. В частности, при относительной погрешности экспериментальных данных $\delta = (\Delta/\sigma_{\max}) \cdot 100\% \approx 10\%$ и $N \geq 30$ относительная погрешность результатов составляет величину $\approx 5\%$.

Отметим, что искомые параметры нагрузки (их математические ожидания), получаемые при использовании в качестве целевой функции среднеквадратичного отклонения, мало отличаются от их величин, получаемых при использовании функции максимального отклонения; однако дисперсии значений этих параметров во втором случае выше (рис. 4).

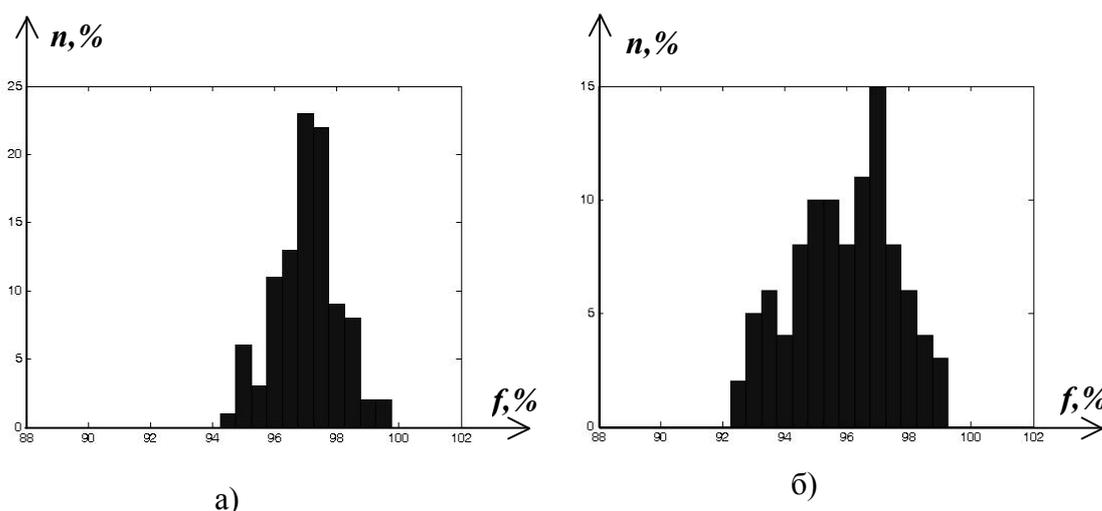


Рис. 4. Гистограммы разброса результатов решения для $\delta = 10\%$: f – отношение полученного решения к его заданной оценке;
 n – относительное количество решений в данном интервале f ;
а) целевая функция - среднеквадратичное отклонение,
б) целевая функция - максимальное отклонение.

В заключение заметим, что разработанные в рамках проведенного исследования алгоритмы и программы, осуществляющие совместный непрерывный обмен данными между программными комплексами ANSYS (решение краевой задачи механики деформированного твёрдого тела) и MATLAB (минимизации целевой функции), открывают возможности для решения ряда других обратных задач механики, связанных с математической обработкой экспериментальных данных. К ним, в первую очередь следует отнести:

- методы исследования неоднородных полей остаточных напряжений [3];

- методы оценки нагруженности конструкций (как с поверхностными трещинами, так и без трещин) при упруго-пластических деформациях.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (Проект РФФИ 07-08-00531).

Литература

1. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упруго-пластического разрушения. М.: Наука. 1985. 502 с.
2. Чернятин А.С. Метод оценки нагруженности конструкций с поверхностной трещиной путём высверливания малого отверстия в её вершинах. Тезисы докладов XVII Международной Интернет-конференции молодых учёных и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2005). Москва, Изд-во ИМАШ РАН, 2005.
3. 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.

Поступила: 14.04.10.