

ФИЗИКА

*Ксения Владимировна СЫЗРАНЦЕВА —
доцент кафедры кибернетических систем
Института нефти и газа
Тюменского государственного нефтегазового
университета,
кандидат технических наук*

УДК 539.319: 519.2

ВОССТАНОВЛЕНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ ДЕТАЛЕЙ И МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается методика оценки нагруженности деталей в реальных эксплуатационных условиях, основанная на использовании датчиков усталости (датчиков деформаций интегрального типа), для расшифровки показаний которых применяется конечно-элементный анализ в программном комплексе ANSYS.

The paper considers method of load ability estimation for details in operational conditions based on using of fatigue gauges (Integral Strain Gauges). For decoding of gauges indications author have used Finish Element Analysis in program ANSYS.

Оценка надежности технических систем, как на этапе проектирования, так и при эксплуатации, является важнейшей проблемой, актуальность решения которой в настоящее время постоянно возрастает. В то же время для решения этой задачи необходима информация о реальной нагруженности изделия в процессе эксплуатации. Поскольку большинство деталей и металлоконструкций выходит из строя из-за повреждения от усталости, для расчета индивидуального остаточного ресурса изделия необходимо оценить как нагрузки, воспринимаемые деталями, так и степень усталостного повреждения деталей.

Регистрация в процессе испытаний степени усталостного повреждения деталей может быть выполнена различными способами. В работе [1] показано, что в ходе эксплуатационных испытаний машин необходимая как для оценки нагруженности, так и для прогнозирования индивидуального ресурса деталей информация может быть получена с помощью индикаторов усталости. Среди них перспективными являются датчики деформаций интегрального типа (ДДИТ), представляющие собой полоски металлической фольги, полученной по специальной технологии [2]. В процессе циклического деформирования свойства материала датчика изменяются, и на его поверхности появляется реакция — «темные пятна».

Методика определения нагруженности деталей с помощью ДДИТ проводится в несколько этапов. На первом этапе строится тарировочная зависимость для образцов [1] в виде функций:

$$u = u(N), \quad \sigma_1 = \sigma_1(N) \quad \text{либо} \quad \varepsilon_{сж} = \varepsilon_{сж}(N),$$

где u — перемещения; σ_1 — главные напряжения; $\varepsilon_{сж}$ — деформации сжатия; N — число циклов нагружения исследуемой детали.

В случае сложного напряженно-деформированного состояния (НДС) детали, когда конфигурация границ «темных пятен» отражает особенности НДС, предпочтительным является использование тарировочной зависимости вида $\varepsilon_{сж} = \varepsilon_{сж}(N)$, поскольку, как показывает опыт исследования [3], материал датчика реагирует потемнением поверхности именно на сжатие и форма границ первых «темных пятен» аналогична картине распределения деформаций сжатия.

На втором этапе проводятся эксплуатационные испытания исследуемой детали или металлоконструкции до момента получения реакции на датчике.

Третий этап предполагает восстановление картины нагружения детали путем идентификации реакции ДДИТ с результатами расчета НДС исследуемой детали. Для реализации этой оценки целесообразно воспользоваться одним из пакетов конечно-элементного анализа. Из довольно широкого ряда данных программных средств автором выбран пакет ANSYS [4] как наиболее универсальное средство моделирования нагружения практически любых типов конструкций, предоставляющий расчетчику возможность программирования и встраивания в пакет собственных модулей, а также позволяющий исследовать процессы разрушения металла.

Рассмотрим реализацию данного этапа на двух примерах расшифровки показаний ДДИТ.

Пример 1. Исследование нагруженности зубьев колес с профилем Новикова ДЛЗ.

Расшифровке были подвергнуты фотографии реакции ДДИТ, полученные в ходе экспериментального исследования [5] распределения нагрузки между двумя контактными линиями зубчатой передачи Новикова ДЛЗ.

В ходе конечно-элементного анализа в ANSYS решалась плоская задача нагружения профиля зуба, закрепленного в основании, с приложенными на двух участках профиля распределенными нагрузками (рис. 1). Геометрическая модель была построена стандартными средствами препроцессора. Дискретизация проводилась методом наложения свободной сетки из восьмиузловых квадратичных элементов типа PLANE183.

После решения задачи в ANSYS становится возможным построить картины распределения стандартных физических величин, таких, как компоненты векторов перемещений, деформаций, напряжений и др. Но для расшифровки реакции ДДИТ необходимо иметь картины распределения деформаций сжатия, которых в списке выводимых ANSYS результатов нет. Поэтому для построения картины распределения сжимающих деформаций автором был разработан специальный макрос на языке APDL, реализующий операции с массивами таблиц элементов. Результат отработки данного макроса для исследуемого профиля зуба представлен на рис. 2а. Ис-

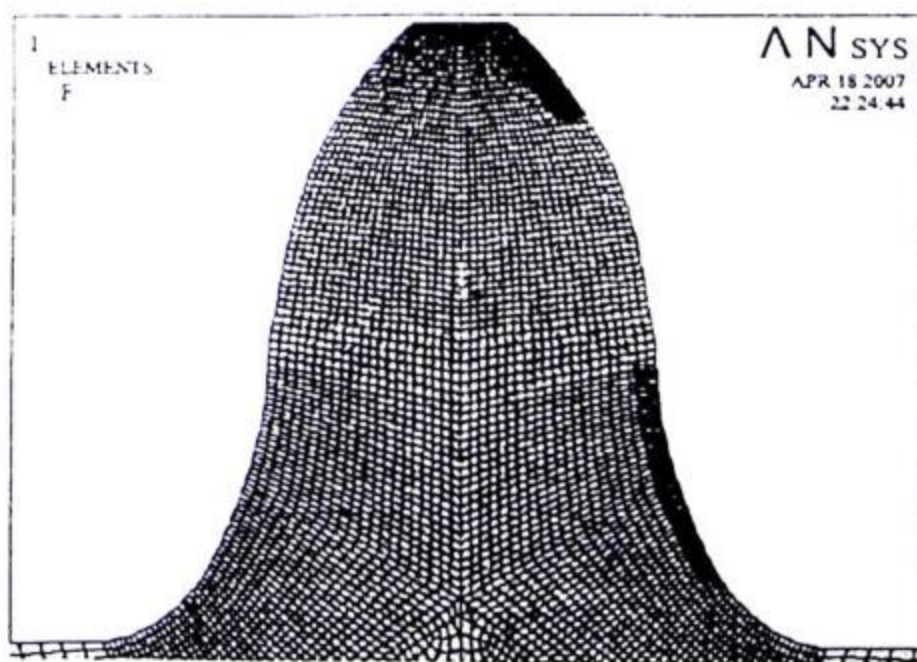
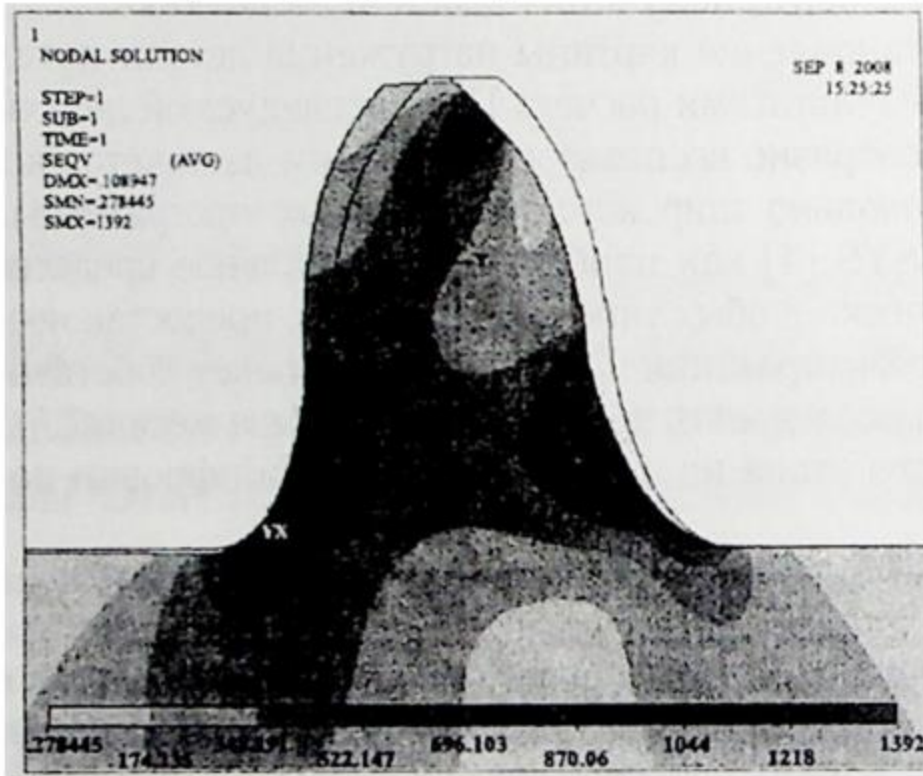


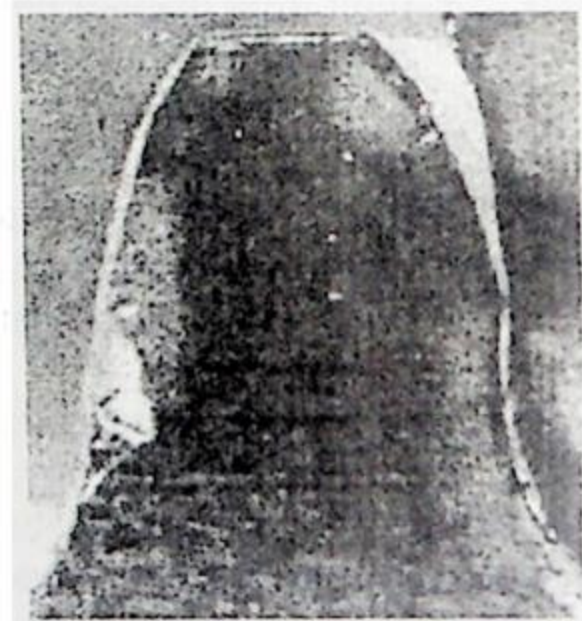
Рис. 1. Конечно-элементная модель зуба с приложенной нагрузкой

ходный контур показан тонкой линией, деформации увеличены в 100 раз для наглядности.

Рис. 2б представляет собой фотографию реакции ДДИТ, полученную в ходе проведения эксперимента [5]. Нетрудно заметить хорошее согласование расчетной картины и экспериментальных данных. Поскольку реальные места приложения и величины нагрузки, действующие на деталь в процессе эксплуатации, не всегда бывают известны, именно в результате расшифровки картины ДДИТ можно восстановить фактические условия нагружения зубьев: методом итераций, последовательно просчитывая в ANSYS НДС детали, варьируя места и величины приложения нагрузок и после каждого расчета анализируя соответствие картины распределения деформаций сжатия и реакции датчика, в итоге постепенно приближаются к их согласованию.



а) распределение деформаций сжатия в торцевом сечении зуба



б) фотография реакции ДДИТ

Рис. 2. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для оценки нагруженности зубьев колес Новикова

В результате восстановленных условий нагружения исследуемого зуба становится возможным реализовать и другие варианты расчета его НДС, например, определение характера распределения главных напряжений в основании зуба (рис. 3).

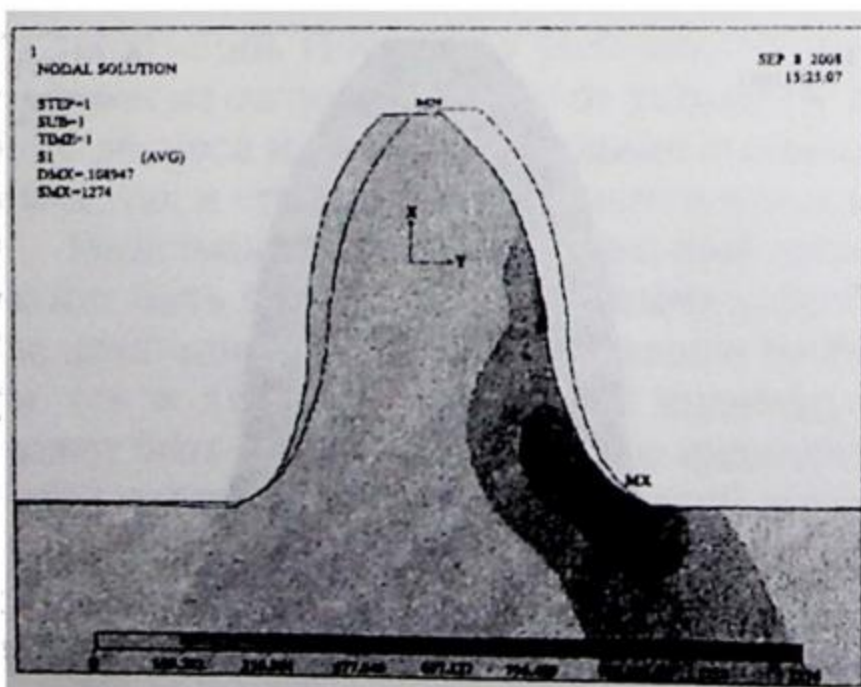


Рис. 3. Распределение главных напряжений σ_1 в сечении зуба

Пример 2. Исследование процесса усталостного разрушения образца, имеющего краевую трещину.

Известно, что накопление усталостных повреждений в процессе циклического деформирования детали сначала приводит к зарождению микротрещины, возникающей обычно в зоне концентрации напряжений, вызванной либо физической неоднородностью металла, либо особенностями геометрической формы детали. При дальнейшем циклическом деформировании детали микротрещина развивается в макротрещину, которая, в конечном ито-

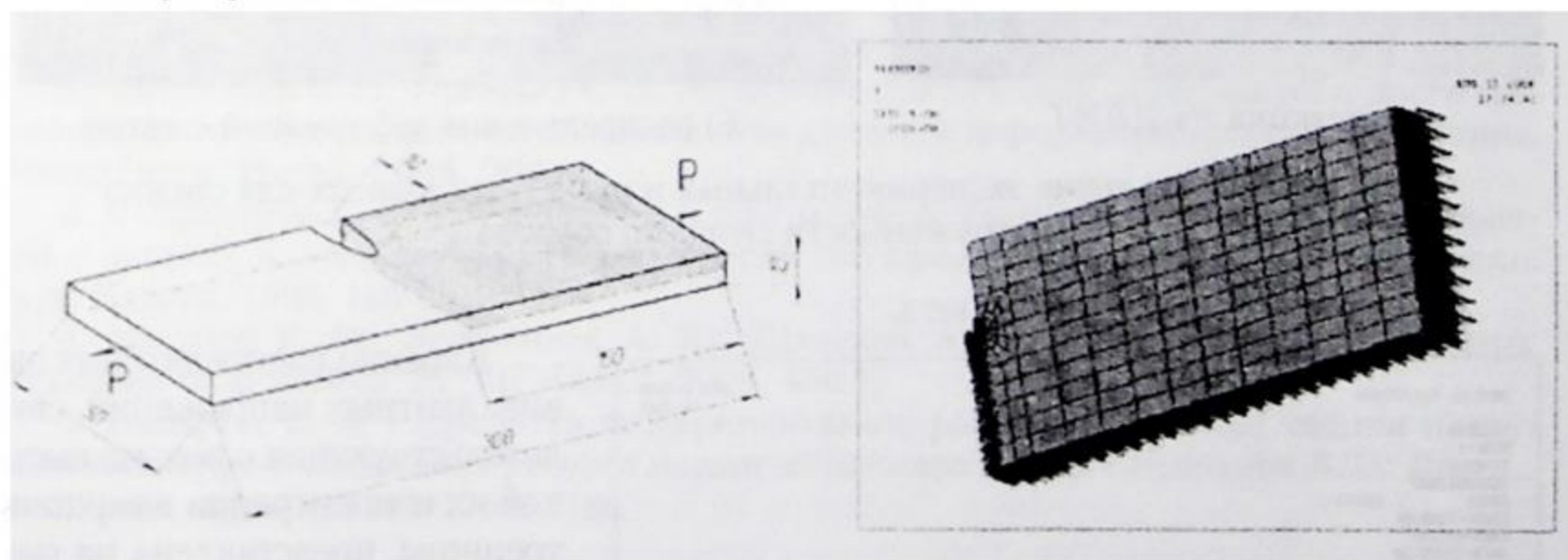
ге, вызывает разрушение детали. Для оценки скорости роста усталостных трещин необходимо определить параметры механики разрушения, которые могут быть вычислены с достаточной степенью точности путем компьютерного моделирования с помощью программного комплекса ANSYS [4]. В то же время для корректного использования результатов моделирования необходимо иметь данные их согласования с реальным характером распределения напряжений в вершине трещины. Такие данные позволяют получить ДДИТ при помещении (наклейке) их на поверхность детали, имеющую трещину. Рассматриваемый ниже пример иллюстрирует решение задачи.

Прямоугольный образец, имеющий краевую трещину, подвергался усталостным испытаниям в условиях растяжения. Для фиксации степени поврежденности в ходе проведения эксперимента на его поверхность в области развития трещины был помещен ДДИТ.

В силу симметрии образца относительно двух плоскостей конечно-элементному анализу подвергалась его $1/4$ часть. Расчетная схема нагружения образца представлена на рис. 4.

Основные этапы решения задачи.

1. Геометрическая модель строилась с учетом возможности расчета параметров механики разрушения: в окрестности вершины трещины были созданы вспомогательные поверхности, очерченные дугами, для генерации в вершине трещины сингулярных элементов.



а) геометрическая модель

б) конечно-элементная модель

Рис. 4. Расчетная схема нагружения образца

2. Разбивка на конечные элементы.

Поверхности, описывающие верхнюю грань образца, подвергались дискретизации двумерными квадратичными элементами, причем вокруг вершины трещины были созданы треугольные вырожденные сингулярные элементы с промежуточными узлами, сдвинутыми на $1/4$ в сторону вершины, поскольку именно они способны корректно описать тот всплеск напряжений, который наблюдается в вершине трещины. Остальные элементы заданы квадратичными четырехугольными. В результате операции выдавливания были сгенерированы трехмерные квадратичные элементы по всему объему образца (рис. 4б).

3. Приложение граничных условий.

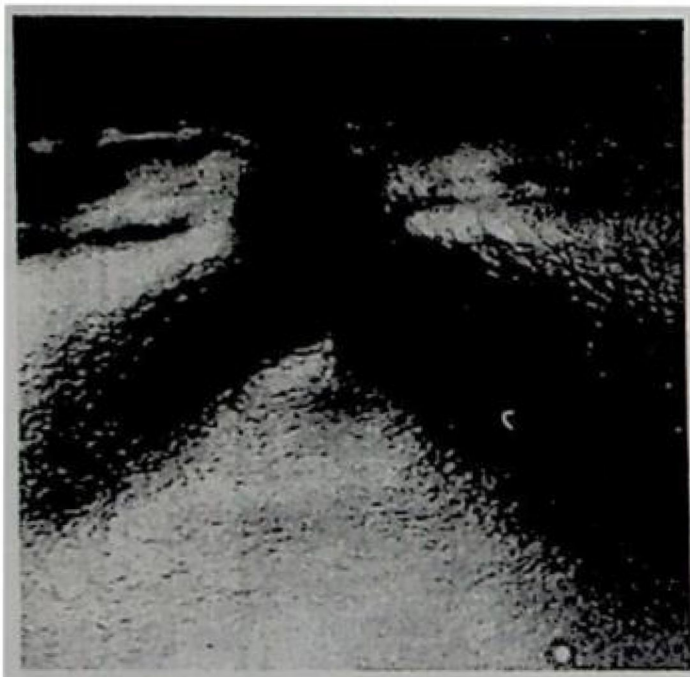
На соответствующих плоскостях были заданы условия симметрии (узлы с нулевыми степенями свободы показаны на рис. 4б значками), а к боковой грани модели приложено давление в 100 МПа, моделирующее растяжение образца и аналогичное проведенным экспериментальным работам.

4. Решение задачи.

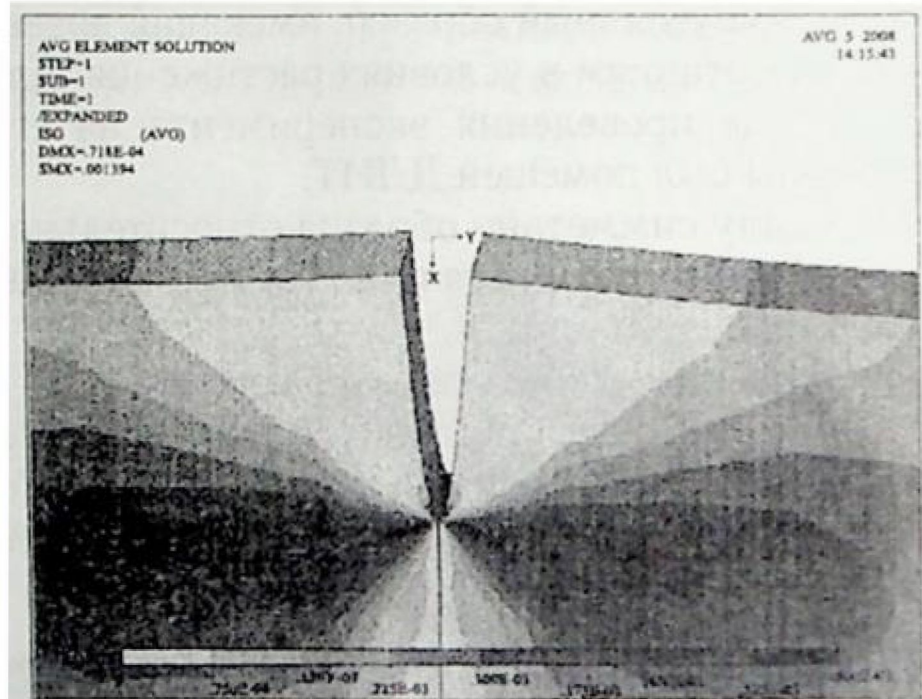
Для решения описанной задачи был выбран прямой решатель (SPARSE SOLVER), именно он используется в ANSYS по умолчанию.

5. Расшифровка показаний ДДИТ.

В ходе проведения эксперимента, проведенного в лаборатории Курганского государственного университета Д.А.Троценко, были получены фотографии реакции датчиков (рис. 5а), которые после проведения конечно-элементного анализа были расшифрованы с помощью соответствующих картин распределения деформаций сжатия (рис. 5б).



а) реакция на ДДИТ



б) распределение деформаций сжатия

Рис. 5. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных для оценки нагруженности сварного образца

6. Анализ результатов расчета.

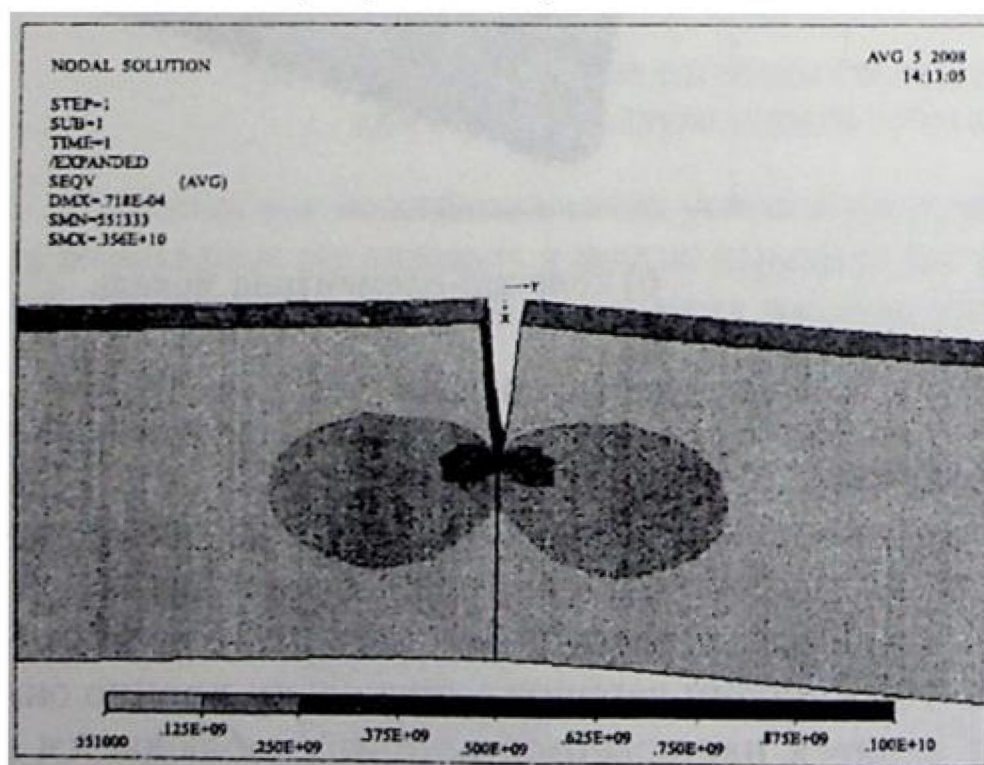


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений в образце

Картина распределения эквивалентных напряжений, свидетельствующая о весьма высокой их концентрации в вершине трещины, представлена на рис. 6. Деформация модели увеличена в 50 раз для наглядности.

7. Оценка параметров механики разрушения.

Для анализа процесса развития трещины необходимы два параметра: К_I-коэффициент интенсивности напряжений (КИН) и инвариантный J-интеграл. Как показано в работе [4], раскрытие трещины возникает, если КИН превысит предельно допустимую величину.

В случае решения упругой задачи величина J-интеграла нужна лишь для уточнения КИН. Расчет величины K_I для трещины отрыва осуществлен с использованием команды KCALC пакета ANSYS, а при расчете J-интеграла — макроса на языке APDL, приведенный в [4]. В результате были получены следующие величины:

$J=5621,12$; $K_I=34,752 \cdot \sqrt{m}$ по методу перемещений;

$K_I=36,05 \text{ МПа} \cdot \sqrt{m}$ по методу J-интеграла.

Расхождение в 3,6% в результатах расчетов КИН двумя различными способами вполне допустимо.

Когда конечно-элементное моделирование завершено и установленные картины распределения деформаций сжатия на поверхности детали в вершине трещины идентичны данным, полученным после обработки реакции ДДИТ с использованием тарировочной зависимости, можно определить эквивалентное число циклов нагружения детали, а затем на основе представленных в работах [1,2] методик реализовать процедуру прогнозирования долговечности исследуемой детали.

Изложенный расчетно-экспериментальный метод позволяет с достаточной степенью достоверности оценить значения ответственных за процесс роста трещины параметров, входящих в расчетные уравнения по определению долговечности при расчете ресурса изделий, и тем самым исключить возможность аварии исследованного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сызранцев В. Н., Голофаст С. Л., Сызранцева К. В. Диагностика нагруженности и ресурса деталей трансмиссий и несущих систем машин по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. Новосибирск: Наука, 2004. 188 с.
2. Сызранцев В. Н., Голофаст С. Л. Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показаниям датчиков деформаций интегрального типа. Новосибирск: Наука, 2004. 204 с.
3. Сызранцева К. В. Методическое и программное обеспечение измерения напряжений в деталях машин датчиками деформаций интегрального типа: Дисс. ... канд. техн. наук. Курган, 1998. 154 с.
4. Морозов Е. М., Муйземнек А. Ю., Шадский А. С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. М.: ЛЕНАНД, 2008. 456 с.
5. Голофаст С. Л. Разработка экспериментально-расчетных методов оценки нагруженности и прогнозирования ресурса машин на примере передач Новикова ДЛЗ: Дисс. ... канд. техн. наук. Курган, 1994. 218с.

*Андрей Николаевич АКСЁНОВ —
инженер ОАО «Газтурбосервис»*

*Александр Борисович ШАБАРОВ —
зав. кафедрой механики и многофазных систем
Тюменского государственного университета,
доктор технических наук, профессор*

УДК 532.6

РАСЧЕТ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСЗВУКОВОГО ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

АННОТАЦИЯ. Представлены результаты моделирования течения в трансзвуковом компрессоре NASA Rotor 37 с помощью различных моделей турбулентности; проводится сравнение расчетных и экспериментальных степени повышения полного давления и адиабатического КПД компрессора.