

Рис. 2. Статическое давление в компрессоре высокого давления

В качестве рабочего тела использовался воздух, подчиняющийся закону идеального газа. Вязкость рабочего тела подчиняется закону Сатерленда. При разбиении модели структурно на гексаэдральные конечные элементы с помощью модуля *TGrid*, было создано несколько вариантов сеток: по 1300000, 600000 и 250000 элементов для

одного венца. Максимальное число элементов для венца составляет 1 300000 элементов, и для всей системы $\approx 20\,000\,000$ элементов. При расчете используется модель турбулентности *SST k- ω* . Расчет велся в стационарной постановке.

Для достижения сходимости задачи необходимо прохождение приблизительно 300 итерации. Так при расчёте на грубой сетке решение было получено через ≈ 10 часов на обычном компьютере, и через 2,5 часа на суперкомпьютере. Также стоит отметить, что при решении на качественной сетке решение на суперкомпьютере заняло 4 часа.

В результате была отработана методика расчета компрессоров, получены интегральные параметры компрессоров.

УДК 539.3

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ ТИПА УГЛОВЫХ ВЫРЕЗОВ

Шацкий А.Н.¹, Буханько А.А.²

¹ОАО «Кузнецов», г. Самара

²Самарский государственный аэрокосмический университет

NUMERICAL-ANALYTICAL SIMULATION METHOD OF PLASTIC FLOW FOR ANALYSIS OF CONSTRUCTIONAL ELEMENTS WITH DAMAGE IN FORM OF ANGULAR NOTCHES

Shatskiy A.N., Bukhanko A.A. Numerical-analytical approach to analysis of strain fields in the neighborhood of an angular notch is considered on basis of the problem of elastic-plastic specimen extension under the condition of axisymmetric strain. General problem of constructing of special finite elements is considered. Such elements allow describing the condition of accumulation of ultimate strains in the neighborhood of angular notch together with known software (MSC, ANSYS, LS-DYNA etc.)

Одним из источников повреждаемости материала элементов конструкций в процессе эксплуатации является диссипация работы внутренних сил, которая оценивается удельной плотностью диссипации энергии W . Наибольшая плотность этой величины достигается в окрестности приобретенных дефектов (каверн, забоин, царапин и других концентраторов деформаций). Расчет величины W наиболее затруднен в окрестности повреждений типа углового

выреза: известные численные методы не позволяют определить предельное значение W при сколь угодно близком приближении к вершине выреза. Эта проблема может быть решена при рассмотрении аналитических решений в рассматриваемой окрестности.

Пусть тело из упругопластического материала с угловым вырезом с углом раскрытия 2δ находится в условиях осесимметричной деформации, (рис. 1). Предполагается, что в окрестности вершины

выреза поведение материала адекватно описывается жесткопластической моделью. Жесткопластическая область окружена упругопластической областью. Таким образом, исходную задачу предлагается заменить двумя: внешней упругопластической задачей, решение которой строится численным методом; и внутренней задачей для жесткопластического тела, решение которой строится аналитически, т.е. сводится к решению обыкновенных дифференциальных уравнений.

Для решения внешней упругопластической задачи жесткопластическая область исключается. Действие отброшенной области на образец заменяется напряжениями, приложенными вдоль всей жесткопластической границы. Для внутренней задачи рассмотрена окрестность вершины углового выреза, где материал предполагается идеальным жесткопластическим. Эта область представлена как специальный жесткопластический конечный элемент (рис. 1), построенный с помощью двух семейств линий скольжения α и β . Предлагаемый элемент является обобщением элемента для случая плоской деформации, [1]. Аналогичный подход рассмотрен в работах [2-4].

Определение деформаций связано с интегрированием системы уравнений, связывающих тензор деформаций E_{ij} и тензор скоростей деформаций ϵ_{ij} :

$$\frac{DE_{ij}}{Dt} = \frac{dE_{ij}}{dt} + E_{ik}V_{k,j} + E_{jk}V_{k,i} = \epsilon_{ij}, \quad (1)$$

где $\epsilon_{ij} = \frac{V_{i,j} + V_{j,i}}{2}$, V_i - скорость перемещений,

$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + V_k \frac{\partial}{\partial x_k}$ - материальная производная.

Данная система уравнений в пластической области может быть записана в ортогональной криволинейной системе координат, связанной с ортогональными семействами линий скольжения α, β . Пусть R, S - радиусы кривизны, соответственно α, β - линий. В центре вена для верхней половины образца при растяжении материала сходятся линии β , и при приближении к центру вена радиус кривизны R стремится к нулю ($R \rightarrow 0$). Выполнив указанный пере-

ход в преобразованной системе (1), можно получить следующую систему уравнений для величин e, g, θ , связанных с компонентами тензора Альманси E_{ij} в цилиндрических координатах ($E_{rr}, E_{\varphi\varphi}, E_{zz}$):

$$\begin{cases} \frac{\partial e}{\partial \alpha} f + 2\gamma g \cos 2(\theta - \psi) = 0, \\ \frac{\partial g}{\partial \alpha} f + 2\gamma \left(e - \frac{1}{2} \right) \cos 2(\theta - \psi) = 0, \\ \frac{\partial (r^2 E_{\varphi\varphi})}{\partial \alpha} f' = 0, \\ 2g \frac{\partial \theta}{\partial \alpha} f - \gamma \left(e - \frac{1}{2} \right) \sin 2(\theta - \psi) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

$$f = \frac{V_\alpha - [a' \cos \alpha + b' \sin \alpha]}{V_\alpha + \frac{\partial V_\beta}{\partial \alpha}},$$

$$f' = V_\alpha - [a' \cos \alpha + b' \sin \alpha],$$

$$e = \frac{1}{2}(E_{rr} + E_{zz}), g = \frac{1}{2}\sqrt{(E_{rr} + E_{zz})^2 + 4E_{rz}^2},$$

θ, ψ - углы наклона первого (алгебраически наибольшего) главного направления тензоров E_{ij}, ϵ_{ij} ; α - угол наклона α -линии к оси r ; u, v - проекции скоростей перемещений

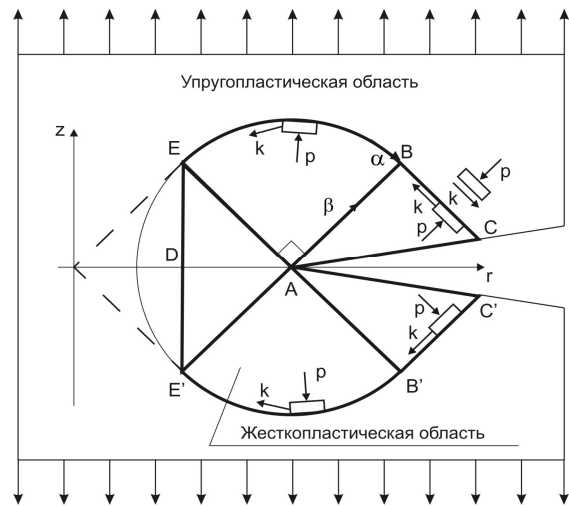


Рис 1. Схема расчета и конечный элемент

на α, β - направления; $\mathbf{m} = a' \mathbf{i} + b' \mathbf{j}$ - вектор скорости возможных изменений положения вершины углового выреза. Аналогичные преобразования для случая плоской деформации выполнялось в работах [1,2].

Поле скоростей внутри жесткопластической области определяется соотношениями:

$$du - vd\theta + V_r \frac{dS_\alpha}{2r} = 0 \quad (\alpha - \text{линия}),$$

$$dv + ud\theta + V_r \frac{dS_\beta}{2r} = 0 \quad (\beta - \text{линия}).$$

Интегрируя систему уравнений (2), можно получить распределение деформаций в окрестности точки A .

Библиографический список

1. Хромов, А.И. Концентраторы деформаций / А.И. Хромов, А.А. Буханько, С.Л. Степанов // Доклады Академии наук. – 2006. – Т. 407, № 6. – С. 777-781.

2. Хромов, А.И. Деформация и разрушение жесткопластических тел / А.И. Хро-

мов. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 181 с.

3. Шацкий, А.Н. Метод расчета предельных пластических деформаций в зоне углового концентратора / А.Н. Шацкий, Я.Ю. Григорьев, О.В. Патлина // Вестник СГАУ. – Самара: СГАУ, 2006. – Ч. 2. – С. 319-322.

4. Григорьев, Я.Ю. О расчете предельных пластических деформаций в зоне углового выреза / Я.Ю. Григорьев, О.В. Патлина, А.Н. Шацкий // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки, 2007. – № 1(14). – С. 161-164.

УДК 539.3

ЗАРОЖДЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В ОКРЕСТНОСТИ УГЛОВОГО ВЫРЕЗА

Кочеров Е.П.¹, Буханько А.А.²

¹ОАО «Кузнецов», г. Самара

²Самарский государственный аэрокосмический университет

FATIGUE CRACK INITIATION IN THE NEIGHBORHOOD OF AN ANGULAR NOTCH
Kotcherov E.P., Bukhanko A.A. The model of plastic flow without fracture in the neighborhood of an angular notch is suggested. This model allows describing dissipative processes that lead to the crack initiation in low-cycle fatigue.

Рассматривается повторно статическое нагружение материала в окрестности углового выреза. Поведение материала моделируется составным телом: внешняя часть материала считается упругопластической и напряженно-деформированное состояние в ней рассчитывается численным методом (например, с помощью пакета ANSYS), внутренняя часть предполагается жесткопластической и напряженно-деформированное состояние описывается аналитически. Такой подход исключает сингулярность полей напряжений и деформаций в окрестности вершины выреза.

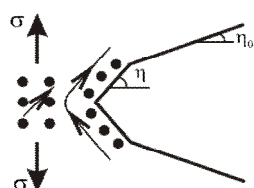


Рис. 1. Схема движения частиц материала

На рис. 1 представлена схема движения частиц материала в окрестности вершины выреза. Это несимметричное движение частиц со смещением с одного бе-

рега на другой, которые соответствуют смещению углового выреза вверх или вниз. Такое пластическое течение не приводит к разрушению материала, т.е. к выходу внутренних частиц на свободную поверхность. На рис. 2 представлено поле линий скольжения, определяющее это пластическое течение. Линия скольжения AE здесь является линией разрыва скоростей перемещений, поэтому после пересечения верха EAF частица испытывает дополнительные пластические деформации и дополнительно рассеивает работу внутренних сил. Подобное пластическое течение рассмотрено в работах [1,2]. Под зарождением трещины понимается пластическое течение в окрестности углового выреза (или остановившейся трещины), в результате которого материал в рассматриваемой области доводится до предельного состояния, соответствующего точке максимального упрочнения.