

УДК 539.4, 519.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ

© Пецев А.В., Степанова Л.В.

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, г. Самара, Российская Федерация*

e-mail: al3xgurk@rambler.ru

Ключевые слова: процесс накопления повреждений, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние, вершина трещины, точное прогнозирование, срок службы.

Многие элементы конструкций, используемые на электростанциях, химических заводах и в авиадвигателях, постоянно подвергаются воздействию высоких температур. Возможность точного прогнозирования срока службы элементов конструкций важна при проектировании компонентов, работающих при высоких температурах [1–5]. На практике рост трещин при ползучести часто является основной причиной разрушения компонентов, работающих при повышенных температурах. Поэтому в последние годы разработке эффективных методов прогнозирования роста трещин в компонентах, работающих при высокой температуре, уделяется все больше внимания [1–5]. В настоящей работе, являющейся продолжением цикла исследований, выполненных в [1–5], проведен численный расчет полей сплошности у вершины трещины в условиях установившейся ползучести посредством включения (интеграции) скалярной меры поврежденности (сплошности) в вычислительные алгоритмы метода конечных элементов (МКЭ) [6]. В программном комплексе SIMULIA Abaqus, поведено конечно-элементное моделирование одноосного растяжения металлической пластины с центральной горизонтальной трещиной в режиме ползучести с учетом накопления поврежденности в плоской постановке задачи (в предположении реализации плоского напряженного и плоского деформированного состояний). Для численного моделирования полей в окрестности вершины используется степенной закон Бейли – Нортон и степенное эволюционное уравнение:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \left(\frac{\sigma_{eff}}{\psi} \right)^{n-1} \frac{s_{ij}}{\psi} t^m \frac{d\psi}{dt} = -A \left(\frac{\sigma_{eff}}{\psi} \right)^l \quad \sigma_{eff} = \alpha \sigma_1 + \beta \sigma_{kk} + (1 - \alpha - \beta) \sigma_e \quad (1)$$
$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 - \sigma_{11} \sigma_{22} + 3\sigma_{12}^2} \text{ (ПНС)} \quad \sigma_e = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2} \text{ (ПД)}$$

Степенной закон ползучести (1) с помощью пользовательской процедуры UMAT (User Material) пакета SIMULIA Abaqus был дополнен кинетическим уравнением накопления поврежденности Качанова – Работнова (КР) в связанной постановке. Вычисления выполнены для классического степенного закона теории установившейся ползучести и степенного эволюционного уравнения модели КР (1) и их обобщений с помощью разработанной пользовательской программы UMAT [1–3]. Результаты МКЭ анализа показаны для плоского напряженного состояния на рис. 1, для случая плоской деформации на рис. 2. Проведен ряд расчетов для различных материалов с различными материальными константами n, m и l .

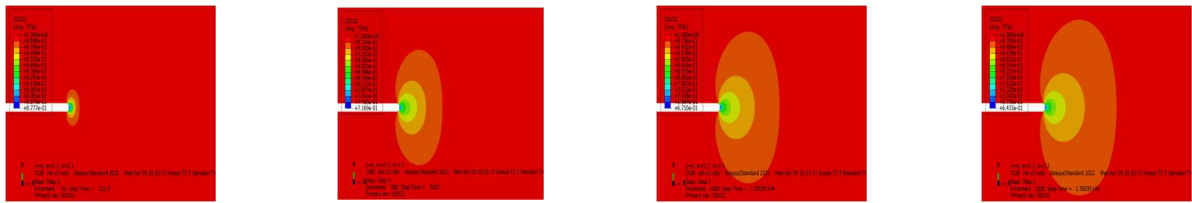


Рисунок 1 – Картины распределений сплошности у вершины трещины для временных шагов, равных 230 часам, 5000 часам, 10000 часам, 15000 часам при плоском напряженном состоянии

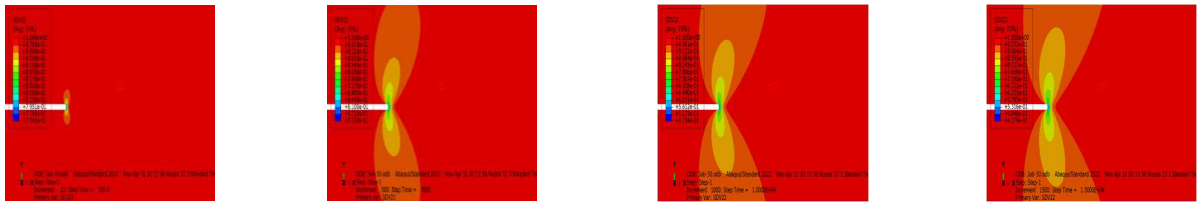


Рисунок 2 – Картины распределение сплошности у вершины трещины для временных шагов, равных 230 часам, 5000 часам, 10000 часам, 15000 часам при плоской деформации

В ходе проведенного исследования были построены конфигурации областей поврежденного материала (областей активного накопления повреждений) как для плоского напряженного состояния, так и плоского деформированного состояния. Проанализирована асимптотика поля напряжений у вершины трещины на основании рассмотрения радиальных зависимостей напряжений от расстояния от кончика трещины. Найдена новая асимптотика поля напряжений, обуславливаемая процессами развития повреждений. Показано, что распределения напряжений обладают свойством автомодельности – подобия распределений характеристик процесса накопления поврежденности и временной эволюции напряжений и деформаций вблизи вершины трещины. Рассмотренное моделирование повреждений при ползучести в сочетании с методом конечных элементов может обеспечить многообещающую систематическую основу для анализа процесса роста трещин. В будущем, хотя это и является более сложным, следует разработать и инкорпорировать в МКЭ расчет модели анизотропных повреждений, отражающие больше механизмов повреждения при ползучести.

Степанова Л.В. благодарит Российский научный фонд (проект № 25-21-00272).

Библиографический список

1. Выявление асимптотического поведения поврежденности у фронта трещины при ползучести на основании конечно-элементных расчетов / Л.В. Степанова, О.Н. Белова, Д.В. Чаплий, Ю.С. Быкова // Прикладная механика и техническая физика. – DOI: 10.15372/PMTF202415561.
2. Белова, О.Н. Применение пользовательской подпрограммы UMAT для решения задач континуальной механики (обзор) / О.Н. Белова, Д.В. Чаплий, Л.В. Степанова // Вестник Самарского университета. Естественная серия. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 46–73.
3. Белова, О.Н. Компьютерное моделирование роста трещин. Метод молекулярной динамики / О.Н. Белова, Д.В. Чаплий, Л.В. Степанова // Вестник Самарского университета. Естественная серия. – 2020. – Т. 26, № 4. – С. 44–55.
4. Исследование асимптотики поля напряжений в окрестности вершины трещины в условиях ползучести с учетом поврежденности / Д.В. Чаплий, О.Н. Белова, Л.В. Степанова, Ю.С. Быкова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 3. – С. 17–38.

5. Чаплий, Д.В. Параметрическое исследование полей, ассоциированных с вершиной трещины, в условиях ползучести с учетом процессов накопления поврежденности с использованием UMAT / Д.В. Чаплий, Л.В. Степанова, О.Н. Белова // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2023. – Т. 27, № 3. – С. 509–529.

6. Быкова, Ю.С. Влияние процесса накопления повреждений на асимптотическое поведение полей напряжений в условиях ползучести образца с центральной трещиной / Ю.С. Быкова, Л.В. Степанова // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. – 2023. – Т. 29, № 4. – С. 7–25.