

УДК 539.4, 519.6

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ, АССОЦИИРОВАННЫХ С ВЕРШИНОЙ ТРЕЩИНЫ В АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛАХ: СОПОСТАВЛЕНИЕ С АНАЛИТИЧЕСКИМ РЕШЕНИЕМ

© Широбоков И.Д., Степанова Л.В.

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

e-mail: issh235@gmail.com

Ключевые слова: анизотропные материалы, конечно-элементное моделирование полей, вершина трещины, численный и асимптотический анализ.

Анализ полей напряжений и перемещений вблизи кончика трещины в анизотропных материалах является одной из важных задач современной механики разрушения [1–5]. В работе был проведён численный и асимптотический анализ полей напряжений у вершины трещины в пластине из ортотропного материала при одноосном растяжении для трёх различных ортотропных материалов ($m_p - 979115$, $m_p - 1652$, $m_p - 2059$ – идентификаторы рассматриваемых материалов в базе материалов Materials Project). Асимптотический анализ полей напряжений был реализован посредством расчёта на основе усечённых рядов асимптотического решения для полей напряжений с удержанием разного числа значимых (отличных от 0) слагаемых. Рассматриваются суммы с числом значимых слагаемых не более 100. Численный анализ был проведён посредством построения конечно-элементной модели пластины с центральной трещиной под одноосной нагрузкой и расчёта поля напряжений на основе этой модели методом конечных элементов в программном пакете SIMULIA ABAQUS. Расчёт на основе асимптотического решения, а также визуализация результатов были проведены в пакете компьютерной математики Maple. Результаты численного и асимптотического анализа приведены на рис. 1–3. Далее приняты следующие обозначения: σ – величина приложенной нагрузки, a – полудлина трещины, θ – полярный угол (полярная ось исходит из вершины трещины и направлена по её продолжению), r – расстояние от вершины трещины, $\sigma_{11} = \sigma_{11}(r, \theta)$.

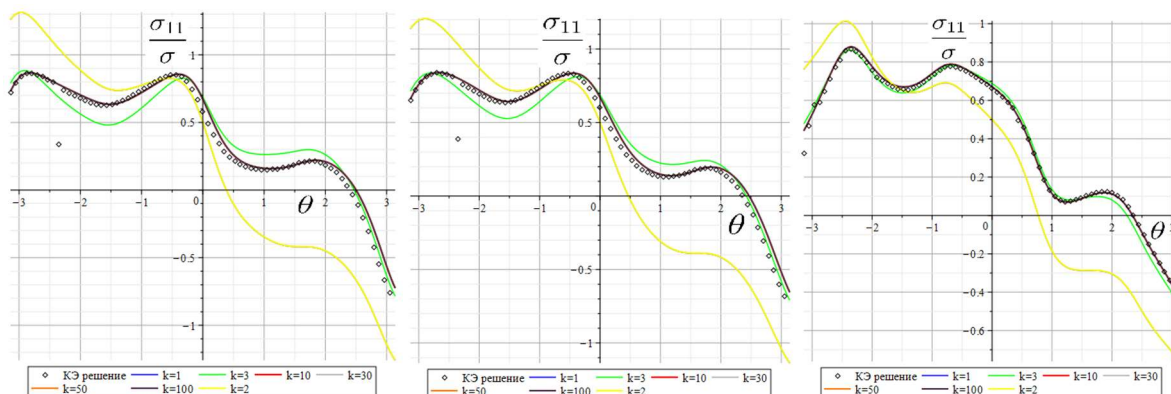


Рисунок 1 – Распределение σ_{11} у вершины трещины при $r = 0.5a$ для $m_p - 979115$, $m_p - 1652$, $m_p - 2059$ соответственно

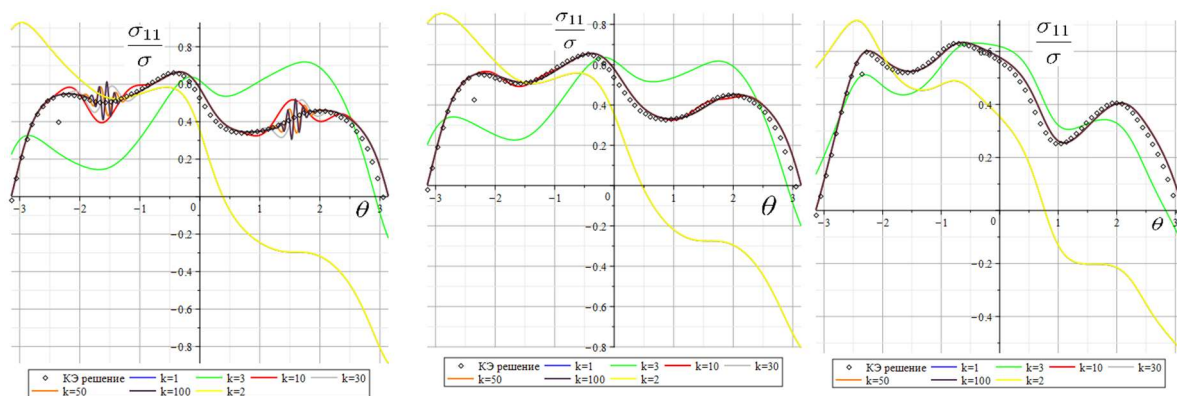


Рисунок 2 – Распределение σ_{11} у вершины трещины при $r = a$ для $tr - 979115$, $tr - 1652$, $tr - 2059$ соответственно

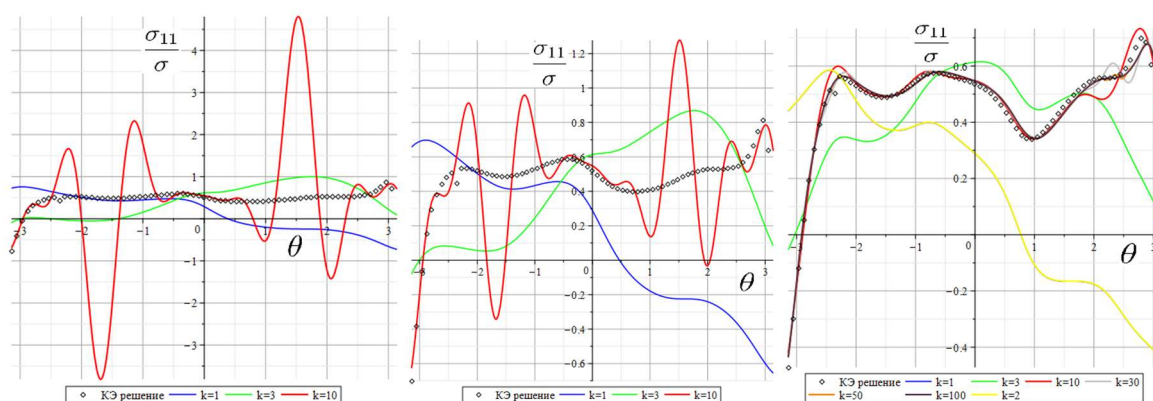


Рисунок 3 – Распределение σ_{11} у вершины трещины при $r = 1.5a$ для $tr - 979115$, $tr - 1652$, $tr - 2059$ соответственно

Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы. В ряде случаев в анизотропных материалах для расширения области справедливости асимптотических разложений следует увеличивать число удерживаемых слагаемых в асимптотических разложениях, представляющих поля напряжений у вершины трещины. Радиус области справедливости усечённых рядов асимптотического решения с числом значимых слагаемых не превосходящим 100, представляющих поля напряжений у вершины трещины в анизотропных материалах, зависит от материальных свойств. Показано, что используемый подход для построения конечно-элементного решения, основанный на введении сингулярных конечных элементов, позволяет получить решение, полностью совпадающее с асимптотическим решением задачи на области его справедливости и, в силу этого, может быть применен для решения численного решения задач, не обладающих аналитическими решениями.

Библиографический список

1. Nejati M. Crack tip asymptotic fields in anisotropic planes: Importance of higher order terms / M. Nejati, S. Ghoul, M. R. Ayatollahi // Applied Mathematical Modelling. – 2021. – Vol. 91. – P. 837–862.
2. Степанова, Л.В. О точности усеченных разложений полей у вершины трещины в анизотропных материалах / Л.В. Степанова, М.А. Фомченкова // Проблемы прочности и пластичности. – 2024. – Т. 86, № 4. – С. 403–420.

3. Степанова, Л.В. Эффекты слагаемых высшего порядка малости в обобщенных рядах для представления полей, ассоциированных с вершиной трещины в анизотропных средах. Часть 1. Сравнение точного и асимптотического решений определения напряжений у вершины трещины / Л.В. Степанова, К.А. Мушанкова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2025. – № 1. – С. 59–81.

4. Степанова, Л.В. Атомистическое и континуальное определение полей напряжений у вершины трещины в анизотропных средах с кубической сингонией / Л.В. Степанова, К.А. Мушанкова // Проблемы прочности и пластичности. – 2024. – Т. 86, № 1. – С. 15–25.

5. Белова, О.Н. Компьютерное моделирование роста трещин. Метод молекулярной динамики / О.Н. Белова, Л.В. Степанова, Д.В. Чаплий // Вестник Самарского университета. Естественная серия. – 2020. – Т. 26, № 4. – С. 44–55.