

УДК 539.3

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МОНОТОННЫХ И МАЛОЦИКЛОВЫХ ТЕРМОСИЛОВЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

© 2011 г.

С.А. Капустин, В.А. Горохов, Ю.А. Чурилов

НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского

sergei.kapustin@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассматриваются математические модели, методы, алгоритмы и результаты численного моделирования на основе метода конечных элементов процессов деформирования и разрушения (от стадии зарождения микродефектов до развития магистральных трещин) элементов конструкций при монотонных и малоцикловых термосиловых нагрузениях.

Ключевые слова: трещина, конструкция, алгоритм, модель, пластичность, повреждение.

Современные подходы к анализу прочности конструкции наиболее широко используют методы линейной и нелинейной механики разрушения, занимающиеся изучением заключительной стадии разрушения – развития магистральной трещины. Значительно меньше внимания уделяется изучению начального периода разрушения, связанного с накоплением повреждений. Однако трещина зарождается и развивается в объемах материала, подготовленных к разрушению в пределах первой, начальной стадии. Поэтому моделирование реальных процессов разрушения конструкций должно обеспечивать возможность описания протекания этих процессов как на начальной, так и на заключительной стадиях.

Исследование процессов деформирования и накопления повреждений в материале конструкций осуществляется в рамках соотношений механики поврежденной среды с использованием предложенной авторами составной иерархической модели поврежденного материала [1, 2], позволяющей исследовать поведение конструкций с учетом особенностей процессов разрушения на начальной и заключительной стадиях. В основу модели положена возможность представления сложного процесса развития взаимосвязанных эффектов деформирования и разрушения в виде последовательности формально независимых элементарных актов, описываемых соответствующими частными моделями пластичности, ползучести и накопления повреждений. Учет взаимного влияния таких элементарных актов осуществляется на верхнем уровне в общей модели поврежденного материала. При этом описание взаимо-

действия различных видов поврежденности и влияния их на процесс деформирования строится на основе инвариантной по отношению к природе этих повреждений скалярной меры поврежденности.

В основу частных моделей пластичности, ползучести и накопления повреждений, реализованных в составе рассмотренной модели поврежденного материала, положены варианты моделей термопластичности и термползучести с комбинированным упрочнением, а также различные варианты кинетических уравнений, описывающих накопление повреждений и деградацию материала для различных механизмов разрушения.

Исследование поведения конструкций на основе принятых уравнений строится путем пошагового интегрирования инкрементальных уравнений, записанных в метрике текущей деформированной конфигурации с использованием комбинированной шаговой схемы [2].

Суть этой схемы заключается в оптимальном сочетании простейших схем интегрирования эволюционных уравнений пластичности, ползучести и накопления повреждений в отдельных точках материала с итерационным уточнением равновесного состояния конструкции в целом. На шагах верхнего уровня (этапах нагружения) осуществляется внешняя линеаризация задачи. Реальный процесс нагружения представляется в виде кусочно-гладкой кривой в пространстве параметров нагружения и аппроксимируется совокупностью прямолинейных участков, величина которых определяется условиями удовлетворительной аппроксимации исследуемой траектории.

Каждый этап в свою очередь подразделяется на ряд регулярных шагов среднего уровня (подэтапов), число которых определяется из условия эффективности применения используемой схемы геометрической линейаризации. Решение нелинейных задач на каждом подэтапе осуществляется в форме метода начальных напряжений. Для ускорения сходимости итерационного процесса на подэтапах используется схема промежуточных экстраполяций [2], позволившая значительно ускорить процесс решения нелинейных задач.

В результате завершения вычислений на подэтапе производится пересчет конфигурации системы и текущих значений компонент тензора напряжений.

Для определения изменений необратимых деформаций и поврежденности в пределах подэтапа строится внутренняя шаговая схема, позволяющая с нужной степенью точности вычислить скорости изменения этих величин для внутренних точек траекторий деформирования и проинтегрировать их в пределах текущего этапа. На внутренних шагах все вычисления строятся независимо для тех точек материала, где происходит изменение необратимых деформаций без коррекции уравнений равновесия.

Таким образом, в результате последовательного вычисления величин, входящих в уравнения пластичности, ползучести и накопления повреждений, на каждом шаге низшего уровня и суммирования их в пределах этапа нагружения могут быть определены все значения функций, необходимые для получения текущего приближения решения нелинейной задачи.

Численное решение линейаризованных задач осуществляется на основе метода конечных элементов (МКЭ) с использованием универсальных моделей изопараметрических конечных элементов, обладающих высокой эффективностью при анализе как массивных, так и тонкостенных фрагментов [2].

Для оценки работоспособности конструкций, нарушение которой может быть связано с разрушением, исчерпанием несущей способности или другими видами предельных состояний, в процессе решения задачи осуществляется анализ нескольких критериальных условий [2]. В частности, рассмотрены локальные критерии, заключающиеся в достижении допустимых значений мер поврежденности (напряжений, необратимых деформаций) в отдельных участках конструкции и глобальные критерии, основанные на установлении предельных значений параметров нагружения, при которых происходит исчерпание конструкцией ее несущей способности.

Обсуждаются алгоритмы, обеспечивающие возможность моделирования в рамках соотношений механики поврежденной среды процессы зарождения и развития магистральных трещин без изменения исходной схемы дискретизации исследуемых конструкций, а также алгоритмы, позволяющие значительно сократить общую трудоемкость решения краевых задач оценки малоциклового прочностных конструкций за счет прогнозирования параметров накопления повреждений в процессе пошагового решения задачи.

Перечисленные модели, численные схемы и алгоритмы послужили методической основой создания в НИИ механики ННГУ программных средств численного моделирования на основе МКЭ процессов деформирования и разрушения конструкций при различных режимах квазистатических термосиловых нагружений, реализованных в рамках вычислительного комплекса ВК УПАКС [2, 3].

Рассмотрены архитектура и функциональные возможности ВК УПАКС, приведены результаты численных исследований, выполненных с помощью программных средств этого комплекса, иллюстрирующие область применения, работоспособность и эффективность разработанных средств.

Представлены результаты численного моделирования процессов упругопластического деформирования и разрушения плоского образца с концентратором. Образец выполнен из алюминиевого сплава АК-4 и шарнирно оперт на две жесткие опоры. Нагружение образца осуществлялось за счет перемещения захватов испытательной машины через индентор, установленный по ширине образца в его центральном сечении. Экспериментальные исследования, связанные с построением материальных функций материала и с изучением процесса разрушения образца, были выполнены сотрудником НИИ механики ННГУ Л.Н. Крамаревым.

Численный анализ процессов деформирования и разрушения образца осуществлялся в пространственной постановке для симметричной 1/4 его части с использованием изопараметрических двадцатиузловых конечных элементов, реализованных в ВК УПАКС. В ходе расчетов установлено, что результаты численного моделирования процесса разрушения образца достаточно хорошо согласуются с аналогичными экспериментальными данными.

Представлены также результаты применения предложенного алгоритма прогнозирования процессов зарождения усталостных трещин для исследования процессов накопления повреждений

в корсетном образце при различных режимах малоциклового нагружения. Установлено, что предложенный алгоритм оказался достаточно работоспособным при исследовании процессов малоциклового усталости в условиях мягких, жестких, симметричных и несимметричных циклических нагружений при различных значениях параметра асимметрии цикла.

Список литературы

1. Капустин С.А. Численное моделирование процессов деформирования конструкций с учетом соот-

ношений механики поврежденной среды // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-математических процессов: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьк. ун-т. 1989. С. 4–14.

2. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. 226 с.

3. Вычислительный комплекс УПАКС. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС №147 от 31.10.2002.

MODELS AND ALGORITHMS FOR PREDICTING THE NUCLEATION AND PROPAGATION OF CRACKS IN STRUCTURAL ELEMENTS UNDER MONOTONE AND LOW-CYCLE THERMAL AND STRESS LOADING

S.A. Kapustin, V.A. Gorokhov, Yu.A. Churilov

The report examines the mathematical models, methods and algorithms derived from them the results of numerical simulation based on FEM and deformation processes of failure (from nucleation to the development of microdefects major cracks) structural elements under monotone and low cycle state thermal and forced loading.

Keywords: crack, design, algorithm, model, plasticity, damage.