

УДК 539.3

АЛГОРИТМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАЛОЦИКЛОВОЙ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ МКЭ^{*)}

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

НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Разработаны алгоритмы прогнозирования процессов зарождения и развития усталостных трещин при малоцикловых термосиловых нагружениях на основе численного моделирования этих процессов в составе программных средств вычислительного комплекса УПАКС. Проведена верификация предложенных алгоритмов и модифицированного варианта вычислительного комплекса, показавшая принципиальную возможность и эффективность их использования при моделировании процессов малоциклового разрушения элементов конструкций.

Ключевые слова: пластичность, накопление повреждений, малоцикловая прочность, численное моделирование.

Введение

Интенсивное развитие современной вычислительной техники и численных методов позволяет использовать для прогнозирования процессов зарождения и развития усталостных трещин при малоцикловых термосиловых нагружениях подходы, основанные на непосредственном моделировании названных процессов с применением в качестве определяющих уравнений соотношений механики поврежденной среды (МПС).

Реализация такого подхода в рамках программных средств вычислительного комплекса (ВК) УПАКС предполагает дискретизацию процесса нагружения конструкций в виде последовательности участков с линейным изменением внешних воздействий (этапов нагружения), протяженность которых определяется условиями удовлетворительной аппроксимации заданной траектории.

При исследовании циклических нагружений вводится также понятие цикла, содержащего типовой набор повторяющихся этапов, и блока нагружения, объединяющего определенный набор одинаковых циклов. Иначе говоря, в пределах каждого блока осуществляется регулярное циклическое нагружение с фиксированными параметрами типового цикла.

Исследование поведения конструкций в ВК УПАКС осуществляется путем пошагового интегрирования определяющих уравнений для последовательности

^{*)} Выполнено в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, Программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-4807.2010.8).

изменения внешних воздействий, соответствующих текущим этапам нагружения [1, 2]. На каждом этапе решается нелинейная краевая задача для соответствующего изменения внешних воздействий с учетом всей предшествующей истории необратимого деформирования и накопленной поврежденности материала. Ее линейризация осуществляется на основе метода начальных напряжений и схемы самокоррекции при решении задач в геометрически нелинейной постановке. Численное решение линейризованных задач осуществляется в ВК УПАКС на основе метода конечных элементов (МКЭ).

Непосредственное применение описанной выше схемы для исследования поведения конструкций при циклических нагружениях путем последовательного интегрирования уравнений для большого числа циклов представляется весьма затруднительным как из-за большой трудоемкости вычислений, так и вследствие возможности накопления численной погрешности. В связи с этим в настоящей работе предлагается алгоритм прогнозирования процессов зарождения и развития усталостных трещин при малоцикловых термосиловых нагружениях на основе численного моделирования этих процессов в рамках соотношений механики поврежденной среды. В основу алгоритма положена возможность экстраполяции по циклам нагружения параметров, характеризующих упругопластическое состояние и поврежденность материала в узлах конструкции, вплоть до числа циклов, соответствующего моменту завершения первой фазы накопления повреждений в наиболее нагруженной точке конструкции.

1. Методические основы прогнозирования процессов накопления повреждений при малоцикловых термосиловых нагружениях

Отправной точкой создания алгоритмов прогнозирования процессов зарождения и развития усталостных трещин при малоцикловых термосиловых нагружениях послужило теоретически и экспериментально обоснованное положение о многостадийном характере развития повреждений в материале в процессе его деформирования. Согласно этому положению процесс разрушения материала представляет собой последовательность реализации следующих основных стадий:

- первой стадии, характеризуемой зарождением и развитием микропор и микродефектов до образования макроскопического дефекта;
- второй стадии, в пределах которой происходит устойчивое развитие образовавшихся макродефектов до критического значения, соответствующего нарушению сплошности материала в рассматриваемой точке;
- третьей стадии, характеризуемой слиянием образовавшихся макродефектов в одну или несколько магистральных трещин, приводящих к разделению на части (фрагментации) рассматриваемого элемента конструкции.

В пределах первой стадии процесса разрушения происходит преобразование структуры материала в процессе упруговязкопластического деформирования, приводящее к возникновению эффектов упрочнения и разупрочнения, описываемых соответствующими уравнениями термопластичности, а также зарождению рассеянных по объему материала повреждений в виде микропор, микротрещин, характеризующих функцией поврежденности материала Ψ (нормированной энергии повреждения). Влияние накопленных повреждений на упругие характеристики материала на этой стадии до достижения величиной Ψ некоторого амплитудного значения $\Psi = \Psi_a$ незначительно, и мера повреждения ω в пределах этой стадии принимается равной нулю.

На участках регулярных циклических нагружений в пределах этой стадии может происходить стабилизация процесса циклического деформирования, проявляющаяся в стабилизации амплитудных значений напряжений, деформаций, пластических деформаций. На участке процесса от начала стабилизации до конца первой стадии накопления повреждений, соответствующего значению $\psi = \psi_a$, параметры процесса пластического деформирования практически постоянны (амплитудные значения напряжений, деформаций, пластических деформаций, компонентов тензора ρ_{ij}), а интегральные параметры (k_p, ψ), характеризующие накопление повреждений, меняются по закону, близкому к линейному. Поэтому на этом участке можно с достаточной степенью достоверности прогнозировать значения перечисленных выше параметров путем их линейной экстраполяции на определенное число циклов вперед, исключив соответствующую часть трудоемкого процесса пошагового интегрирования уравнений исходной задачи.

Стабилизация процесса деформирования при малоцикловых нагружениях обычно наступает по истечении первых 10–20 циклов либо не наступает вообще. В последнем случае применение каких-либо процедур прогнозирования процесса теряет смысл.

Завершение периода стабилизации процесса циклического деформирования соответствует началу заметного влияния развивающейся поврежденности на характеристики процесса деформирования, т.е. началу второй фазы развития повреждений. При этом в отдельных точках конструкции будет происходить перераспределение действующих напряжений и деформаций и прогноз дальнейшего протекания процесса циклического деформирования может привести к неверным результатам. В связи с этим в качестве конечной точки, характеризующей состояние материала, до которого целесообразно экстраполировать решение, можно выбрать значение функции поврежденности $\psi = \psi_a$, соответствующее концу первой стадии накопления повреждений.

На второй стадии разрушения при $\psi \geq \psi_a$ в материале происходит коллективное взаимодействие развивающихся микропор и микротрещин, завершающееся образованием макродефекта и приводящее к значительному влиянию накопленной поврежденности на макроскопические характеристики материала (модуль упругости, скорость звука и т. д.) и соответственному росту меры повреждения ω . На этой стадии прогнозирование параметров процесса циклического деформирования весьма проблематично.

Перечисленные обстоятельства послужили основой создания алгоритмов прогнозирования процессов зарождения и развития усталостных трещин в элементах конструкций при малоцикловых термосиловых нагружениях [3].

В соответствии с вышесказанным практическая реализация таких алгоритмов требует:

- наличия модели термопластичности, позволяющей адекватно описывать процессы пластического деформирования материалов при малоцикловых термосиловых нагружениях с учетом стабилизации параметров процесса на участках регулярного циклического нагружения;
- модели накопления повреждений, описывающей основные стадии развития повреждений;
- выбора параметров, определяющих начальную и конечную точки экстраполяции.

Для моделирования процесса пластического деформирования материала в предлагаемом алгоритме использована реализованная в ВК УПАКС модель термопластичности с комбинированным упрочнением, описывающая основные закономерности пластического деформирования при регулярных и блочных циклических нагрузениях [1–3] и, в частности, учитывающая тот факт, что при переходных циклических процессах на нестационарных участках основную роль играет изотропное упрочнение материала, а при последующей стабилизации циклического процесса параметры стабилизированной петли не зависят от предшествующей истории циклического деформирования и определяются интенсивностью амплитуды деформаций.

Для иллюстрации возможности описания с помощью приведенной модели стабилизации параметров циклического деформирования материалов ниже приведены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния трубчатого цилиндрического образца, выполненного из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, в условиях жесткого циклического нагружения. Необходимые материальные функции для этого материала построены на основе экспериментальной информации, приведенной в [1].

На рис. 1 показаны графики изменения интенсивности напряжений σ_i (кривая 1), меры пластических деформаций (длины траектории пластических деформаций) k_p (кривая 2) и функции поврежденности ψ (кривая 3) от числа циклов n при жестком циклическом нагружении трубчатого цилиндрического образца с амплитудой осевой деформации $e_1 = 0,01$, полученные в результате численного моделирования процесса с помощью описанной выше модели. Для этой задачи функция поврежденности ψ достигает амплитудного значения $\psi = \psi_a$ при числе циклов $n = 361$.

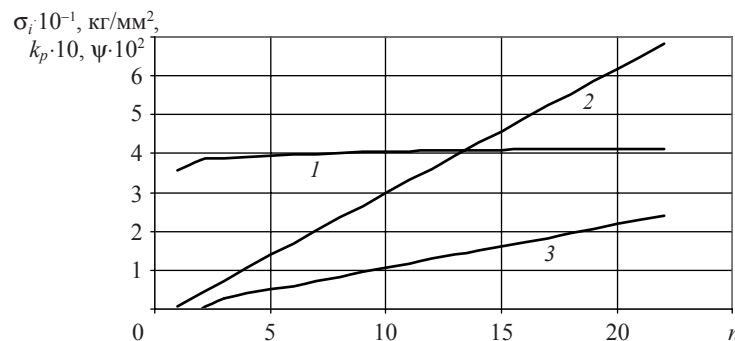


Рис. 1

Из приведенных графиков видно, что стабилизация амплитудных уровней интенсивности напряжений σ_i для этой задачи наступает уже при $n \geq 10$ циклов, при этом функции $k_p(n)$ и $\psi(n)$ становятся практически линейными функциями числа циклов до значений $n \leq 361$.

Таким образом, для приведенной задачи в качестве начальной точки экстраполяции можно выбирать $n \geq 10$ циклов.

Для других задач такую точку можно выбирать из условия стабилизации процесса циклического деформирования, определяемого выходом на линейный участок изменения функции ψ .

В конструкции такое условие должно выполняться одновременно для всех фи-

зических узлов области. При этом допуск δ на отклонение функции $\psi(n)$ от линейного изменения может быть установлен опытным путем.

В качестве конечной точки экстраполяции можно выбрать состояние, при котором наступает вторая фаза накопления повреждений, то есть функция ψ достигнет амплитудного значения $\psi = \psi_a$.

2. Алгоритм прогнозирования процессов накопления повреждений при малоцикловых нагружениях и результаты численного решения

Приведенные выше соображения позволили сформулировать следующий алгоритм прогнозирования процессов накопления повреждений в элементах конструкций при малоцикловых термосиловых нагружениях.

1. В процессе пошагового решения задачи контролируются состояния конструкции, соответствующие концу текущего цикла нагружения с номером n .

2. Для текущего цикла строится цикл обхода физических узлов конструкции.

2.1. Для каждого текущего узла выбираются параметры, характеризующие:

– значение функции поврежденности ψ_{n-1} и параметра $(k_p)_{n-1}$ предыдущего цикла;

– значение функции поврежденности ψ_n и параметра $(k_p)_n$ текущего цикла;

– изменение функции поврежденности $\Delta\psi_{n-1}$ за предыдущий цикл.

2.2. Определяется амплитудное значение функции поврежденности ψ_a , соответствующее текущему значению параметра ρ_c , характеризующего амплитуду пластических деформаций [1].

2.3. Вычисляется значение изменения функции поврежденности $\Delta\psi_n$ и параметра Δk_p за текущий цикл $\Delta\psi_n = \psi_n - \psi_{n-1}$, $\Delta k_p = (k_p)_n - (k_p)_{n-1}$.

2.4. Производится сравнение $\Delta\psi_n$ и $\Delta\psi_{n-1}$; если $|\Delta\psi_n - \Delta\psi_{n-1}| \leq \delta$ (δ – заданная погрешность), то вычисляется шаг экстраполяции CE : $CE = (\psi_a - \psi_n) / \Delta\psi_n$; в противном случае $CE = 0$.

2.5. Запоминаются текущие значения $\psi_{n-1} = \psi_n$; $\Delta\psi_{n-1} = \Delta\psi_n$.

3. Строится цикл обхода физических узлов, в процессе которого выбирается минимальное значение шага экстраполяции $KC = \min(CE)$.

4. Производится сравнение KC с числом KCL , определяющим заданное в условиях задачи минимальное число циклов, начиная с которого допускается экстраполяция.

5. Если $KC \geq KCL$, то производится линейная экстраполяция параметров k_p и ψ для всех физических узлов области на KC циклов вперед:

$$k_p = (k_p)_n + \Delta k_p \cdot KC,$$

$$\psi = \psi_n + \Delta\psi_n \cdot KC.$$

Далее корректируется номер следующего цикла ($n = n + KC$) и управление передается на продолжение вычислений для следующего цикла.

6. Если $KC < KCL$, то экстраполяция параметров k_p и ψ не производится и управление передается на продолжение вычислений в обычном режиме для $n + 1$ цикла.

С целью оценки работоспособности и вычислительной эффективности алгоритма прогнозирования процессов развития повреждений при малоцикловых нагружениях рассмотрен ряд примеров численного моделирования процессов малоциклового деформирования элементов конструкций с помощью ВК УПАКС.

Рассмотрен процесс развития повреждений в трубчатом цилиндрическом образце, изготовленном из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, в условиях однородного напряженного состояния при симметричных циклических нагружениях с амплитудными значениями перемещений по торцам рабочей части $u_x = \pm 0,022$ мм. Необходимые материальные функции для этого материала построены на основе экспериментальной информации, приведенной в [1]. Размеры образца: длина рабочей части $L = 60$ мм; толщина стенки $h = 2$ мм; радиус срединной поверхности $R_0 = 100$ мм.

Численное решение задач осуществлялось в осесимметричной постановке с использованием ВК УПАКС.

Процесс нагружения представлялся в виде последовательности одинаковых циклов, причем каждый цикл разделялся на три этапа: нагружение до амплитудного значения нагрузки (осуществлялось за 10 подэтапов), разгрузка с последующим нагружением до отрицательных амплитудных значений (20 подэтапов), разгрузка (10 подэтапов).

Рассмотрены четыре варианта расчета, в которых менялось значение параметра KCL , определяющего минимальное число циклов, начиная с которого допускается экстраполяция.

В первом варианте принималось $KCL = 5000$ – число циклов, заведомо превышающее число циклов разрушения образца, благодаря чему моделирование процесса осуществлялось без промежуточной экстраполяции параметров.

Во втором, третьем и четвертом вариантах число KCL принималось равным 5, 10 и 20 соответственно. Иначе говоря, согласно второму варианту экстраполяция процесса возможна не ранее, чем после 5 циклов (при выполнении условий стабилизации процесса циклического деформирования), а в четвертом – после 20 циклов. При этом параметр δ , определяющий точность стабилизации процесса, принимался таким, чтобы стабилизация процесса наступала при числе циклов $n > 5$.

Результаты расчетов представлены в табл. 1, содержащей наиболее интересные для анализа задачи параметры ($i = 2, 3, 4$ – номер варианта расчета):

- N_0^i – номер цикла, начиная с которого произведена экстраполяция;
- $N_E^i = KC$ – число циклов экстраполяции;
- N_1^i – номер цикла завершения первой стадии накопления повреждений (появление меры повреждений $\omega > 0$);
- N_r^i – общее число циклов до разрушения;
- $\psi^i(n)$ – значение функции поврежденности для цикла с номером n ;
- $k_p^i(n)$ – значение параметра k_p для цикла с номером n ;
- $\omega^i(n)$ – значение меры поврежденности ω для цикла с номером n ;
- E_f^i – мера эффективности процедуры экстраполяции $E_f = KC/N_r^1$, где $N_r^1 = N_r$ для варианта 1;
- E_r^i – мера погрешности прогнозирования момента разрушения (при достижении мерой поврежденности значения $\omega = 0,99$); $E_r^i = |(N_r^1 - N_r^i)/N_r^1| \cdot 100\%$;
- E_1^i – мера погрешности прогнозирования завершения первой стадии накопления повреждений; $E_1^i = |(N_1^1 - N_1^i)/N_1^1| \cdot 100\%$.

Приведенные в таблице 1 результаты показывают, что для рассматриваемой задачи при выбранном значении параметра δ стабилизация процесса наступает уже при $N_0^2 = 7$ циклов. Экстраполяция при этом происходит на $N_E^2 = 775$ циклов, а

погрешность прогнозирования момента разрушения составляет $E_r^2 \approx 2,5\%$. При снижении допуска δ , что эквивалентно увеличению числа N_0^i , все контролируемые параметры (k_p, ψ, ω, N_r) равномерно приближаются к эталонным значениям варианта 1, однако наивысшая эффективность процедуры экстраполяции достигается при некотором оптимальном значении N_0^i , так как с ростом N_0^i точность прогнозирования процесса растет, но увеличивается число циклов до экстраполяции.

Таблица 1

i	1	2	3	4
N_0	–	7	10	20
N_E	–	775	796	794
N_1	825	782	807	815
N_r	1749	1706	1730	1739
$\psi(1500)$	0,853	0,867	0,861	0,856
$\omega(1500)$	0,524	0,592	0,552	0,539
$k_p(1500)$	32,44	32,72	32,69	32,50
E_r	–	0,443	0,455	0,454
E_r	–	2,46	1,1	0,6
E_1	–	5,2	2,2	1,2

Очевидно, что эффективность процедуры экстраполяции зависит от скорости стабилизации процесса и от продолжительности первой стадии накопления повреждений. Причем при одинаковых условиях нагружения и различных амплитудах пластических деформаций в цикле мера эффективности процедуры экстраполяции будет составлять вполне определенную долю от относительной продолжительности первой стадии.

Представленные результаты подтверждают высокую точность и эффективность прогнозирования на основе предложенного алгоритма процессов накопления повреждений при жестких симметричных нагружениях в условиях однородного напряженного состояния.

В предыдущем примере была продемонстрирована возможность применения предлагаемого алгоритма прогнозирования параметров процессов малоциклового деформирования элементов конструкций в условиях однородного напряженного состояния, при котором все величины, характеризующие НДС в точке материала, одинаковы во всех точках. В реальных конструкциях перечисленные величины различны в различных точках конструкции и меняются по разным законам в процессе малоциклового нагружения. Поэтому ниже представлены результаты применения предложенного алгоритма для исследования процессов накопления повреждений в элементах конструкций при неоднородном характере распределения напряжений и деформаций по объему элемента и различных режимах малоциклового нагружения.

В частности, рассмотрен пример численного моделирования процессов малоциклового деформирования и разрушения цилиндрического образца, имеющего в рабочей части выточку с радиусом $R = 8,5$ мм. Диаметр рабочей части образца $\varnothing = 29$ мм, длина рабочей части $L = 30$ мм. Образец выполнен из нержавеющей стали 12X18Н10Т, необходимые для расчетов материальные функции материала, как и в предыдущей задаче, построены на основе экспериментальной информации, приведенной в [1].

Образец равномерно нагревался до температуры $T = 350$ °С и находился в условиях циклического нагружения приложенными по торцу осевыми перемещениями, меняющимися по закону симметричного цикла. Амплитудные значения перемещений на торцевой поверхности образца составляли $u_x = \pm 0,095$ мм.

Ввиду наличия в образце оси симметрии численное решение задачи осуществлялось в осесимметричной постановке с использованием ВК УПАКС.

Процесс нагружения образца представлялся в виде последовательности следующих этапов нагружения:

- 1) Равномерный нагрев образца до $T = 350$ °С.
- 2) Деформирование образца осевыми перемещениями u_x , распределенными по торцевой поверхности образца до амплитудного значения $u_x = +0,095$ мм (нагружение осуществлялось за 10 подэтапов).
- 3) Разгрузка образца и последующее деформирование образца до значения $u_x = -0,095$ мм (нагружение осуществлялось за 20 подэтапов).
- 4) Разгрузка образца до значения $u_x = 0$ мм (за 10 подэтапов).
- 5), 6), 7) и т. д. – повторение этапов 2), 3) и 4), составляющих один цикл нагружения.

Рассмотрены два варианта задачи.

В первом варианте исследование процесса производилось до момента образования трещины без использования процедуры экстраполяции, а во втором принималось $KCL = 20$.

Исследования показали, что на первом цикле нагружения при значении $u_x = 0,019$ мм в наиболее нагруженной точке, расположенной на наружной поверхности центрального сечения образца (в дальнейшем – точка A), появились пластические деформации, которые к концу первой четверти цикла при $u_x = 0,095$ мм охватили практически все сечение образца.

В процессе дальнейшего нагружения зона пластичности распространилась по объему образца и стабилизировалась при $n \approx 15$ циклов. В результате численного решения первого варианта задачи было установлено, что в точке A первая стадия накопления повреждений завершилась при $N_1^1 = 740$ циклов.

При дальнейшем увеличении числа циклов процесс накопления повреждений в этой точке развивался наиболее интенсивно, и на цикле с номером $n = N_r^1 = 1040$ мера поврежденности в этой точке достигла предельного значения $\omega \geq 0,99$.

Согласно результатам второго варианта задачи при $N_0^2 = 20$ циклов была произведена экстраполяция параметров процесса на $N_E^2 = 750$ циклов, причем практически сразу же, при $N_1^2 = 770$ циклов, завершилась первая стадия накопления повреждений в наиболее нагруженной точке образца. Прогнозируемое число циклов до разрушения материала в точке A оказалось равным $N_r^2 = 1067$.

Для сравнения в таблице 2 приведены значения некоторых показательных параметров, подсчитанных в точке A , для рассмотренных вариантов задачи.

Представленные результаты свидетельствуют о приемлемой точности и достаточно высокой эффективности прогнозирования на основе предложенного алгоритма процессов накопления повреждений при жестких симметричных нагружениях в условиях неоднородного напряженного состояния. В частности, для рассматриваемой задачи с помощью такого алгоритма удалось более чем на 70% снизить трудоемкость вычислительного процесса, необходимого для определения начала малоциклового разрушения образца.

Таблица 2

i	1	2
N_0	–	20
N_E	–	750
N_1	740	770
N_r	1040	1067
ψ (800)	0,700	0,673
k_p (800)	30,46	29,79
σ_i (800)	36,7	36,6
E_f	–	0,721
E_r	–	2,60

Дальнейшее исследование процесса разрушения образца осуществлялось на основе продолжения решения второго варианта задачи.

После разрушения материала образца в точке A поврежденность развивалась в виде магистральной трещины вдоль поперечного сечения его средней части по направлению к оси образца. Продвижение трещины сопровождалось перераспределением напряжений в образце в районе выточки, причем зона максимальных напряжений располагалась в кончике трещины и смещалась вместе с ней в процессе продвижения трещины. На рис. 2–4 приведены картины распределения интенсивности напряжений σ_i в продольном сечении образца для циклов $n = 1122, 1181$ и 1237, соответствующих различным уровням продвижения трещины.

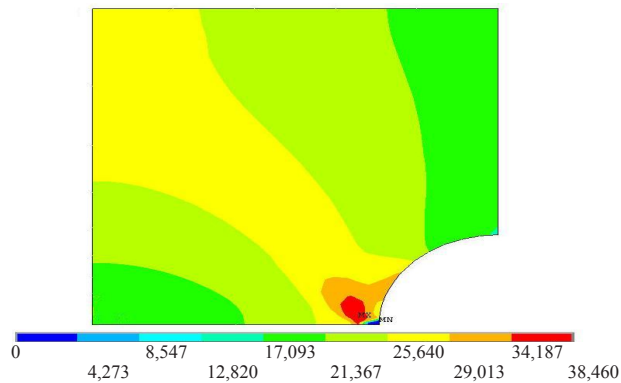


Рис. 2

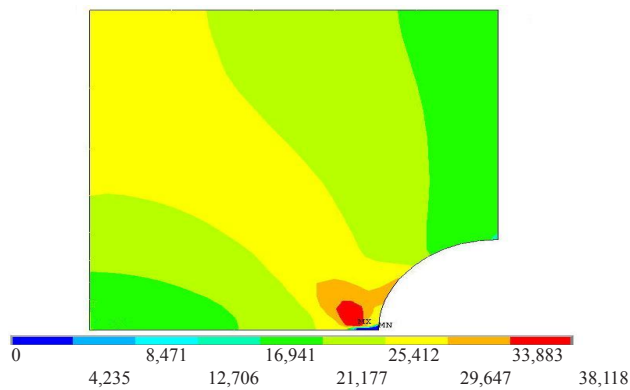


Рис. 3

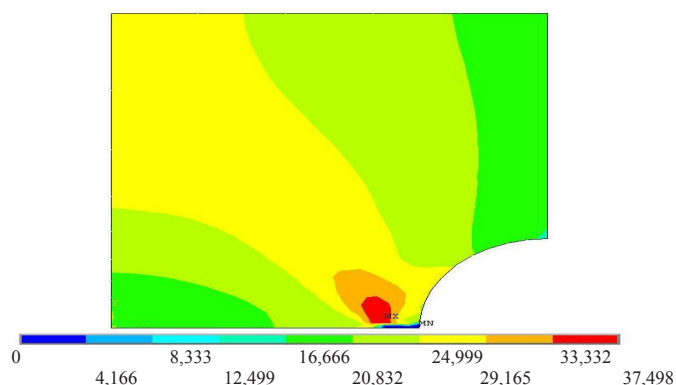


Рис. 4

Конфигурации самой трещины для указанных моментов нагружения изображены на рис. 5 (кадры *а*, *б*, *в* соответственно).

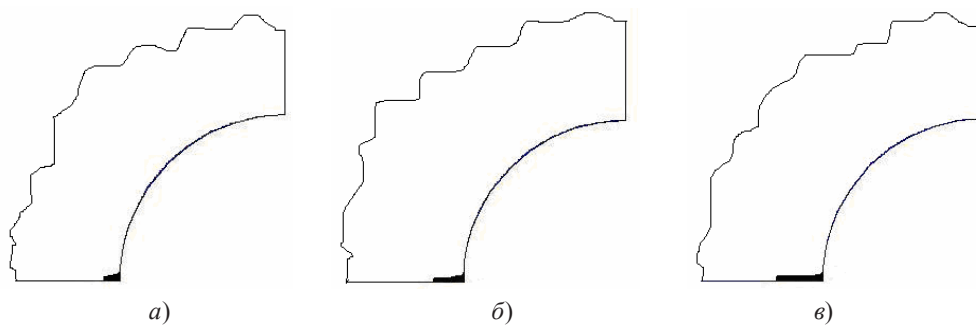


Рис. 5

Изменение состояния материала образца в процессе его малоциклового деформирования сопровождалось перераспределением напряжений и деформаций в образце и, в частности, изменением осевой силы, действующей по торцам образца. На рис. 6 представлен график изменения осевой силы для максимальных точек цикла в зависимости от числа циклов n .

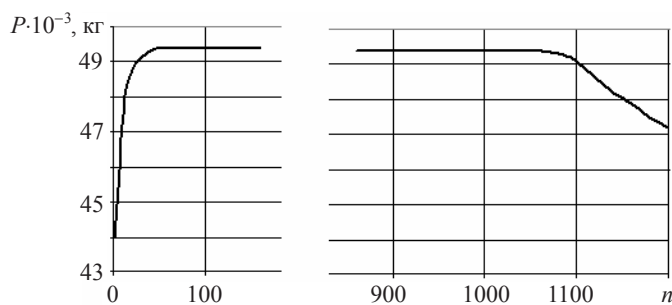


Рис. 6

На нем можно выделить три характерных участка, отражающих специфику

поведения конструкции в условиях упругопластического малоциклового деформирования:

- первый участок ($n = 1 \div 40$) характеризуется ростом торцевой силы за счет упрочнения материала в зонах пластичности;
- в пределах второго участка ($n = 40 \div 1050$) торцевая сила меняется незначительно;
- третий участок ($n \geq 1050$) характеризуется деградацией свойств материала, развитием магистральной трещины в центральном сечении образца и снижением величины торцевой силы.

Подводя итог проведенным исследованиям, можно заключить, что предложенный алгоритм прогнозирования процессов накопления повреждений работоспособен при исследовании процессов малоциклового усталости в условиях жестких циклических нагружений. Эффективность его применения зависит от характера протекания процесса и возрастает с увеличением продолжительности первой фазы накопления повреждений. В последнем из рассмотренных примеров эффективность применения алгоритма достигала значений $E_f \geq 72\%$.

Заключение

В статье представлено описание алгоритма прогнозирования процессов зарождения и развития усталостных трещин при малоцикловых термосиловых нагружениях на основе численного моделирования этих процессов.

Проведена верификация предложенного алгоритма и модифицированного варианта программы, показавшая принципиальную возможность и эффективность их использования для моделирования процессов малоциклового разрушения элементов конструкций, находящихся в условиях однородного и неоднородного напряженного состояния при жестких циклических нагружениях.

В результате проведенных численных исследований показано, что применение предложенного алгоритма позволяет существенно сократить трудоемкость расчетов и затраты машинного времени при моделировании процессов деформирования и разрушения конструкций в условиях циклических нагружений.

Литература

1. Казаков, Д.А. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций / Д.А. Казаков, С.А. Капустин, Ю.Г. Коротких. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. – 226 с.
2. Капустин, С.А. Метод конечных элементов в задачах механики деформируемых тел: Учеб. пособие / С.А. Капустин. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. – 180 с.
3. Капустин, С.А. Численное моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций в условиях квазистатических термосиловых и терморadiационных воздействий / С.А. Капустин, Ю.А. Чурилов, В.А. Горохов // Современные проблемы ресурса материалов и конструкций: Тр. III школы-семинара. – М.: Изд-во МАМИ, 2009. – С. 90–104.

[05.09.2011]

**PREDICTION ALGORITHMS OF THE LOW-CYCLE STRENGTH
OF CONSTRUCTIONS ON THE BASIS OF THE FINITE ELEMENT METHOD**

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

Prediction algorithms of initiation and propagation of fatigue cracks under low-cycle thermal-forced loading on the basis of numerical modeling and the program realization by means of computational code BK УПАКС is developed. Verification of these algorithms and the modified version of the program are performed and the principal possibility and efficiency of their use for the low-cycle fracture modeling of constructive elements is shown.

Keywords: plasticity, damage accumulation, low-cycle strength, numerical modeling.