

УДК 539.3

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОМПАКТНОГО ОБРАЗЦА С ЗАТУПЛЁННЫМ ВЫРЕЗОМ ПРИ БЛОЧНЫХ РЕЖИМАХ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

© И.А. Волков, И.С. Тарасов, М.Н. Фомин, М.Н. Ереев.

*Волжская Государственная Академия Водного Транспорта, Нижний Новгород, Россия.*

*E-mail: [pmptmvgavt@yandex.ru](mailto:pmptmvgavt@yandex.ru)*

*Для оценки напряжённно-деформированного состояния (НДС) и усталостной долговечности ответственных инженерных объектов (ОИО) развита модель повреждённой среды (МПС), состоящая из трёх взаимосвязанных составных частей: соотношений, определяющих упругопластическое поведение материалов, кинетических уравнений накопления повреждений и критерия прочности повреждённого материала. В целях качественной и количественной оценки определяющих соотношений МПС при малоцикловых режимах нагружения проведена оценка усталостной долговечности компактного образца с затуплённым вырезом при циклическом нагружении. Показано, что развитый вариант определяющих соотношений МПС адекватно отражает основные эффекты упругопластического деформирования и процессы малоциклового усталости материалов и конструкций.*

**Ключевые слова:** *напряжённно-деформированное состояние, пластичность, разрушение, накопление повреждений, малоцикловая усталость, долговечность, ресурс.*

**1. Введение.** В течение длительного срока службы в материале конструктивных элементов оборудования и систем ответственных инженерных объектов (ОИО), работающих в условиях нестационарного термосилового нагружения, реализуются процессы накопления усталостных повреждений, приводящие к ухудшению начальных прочностных характеристик конструкционных материалов, образованию и развитию дефектов. В течении значительного периода наработки эти процессы происходят скрытно. Кроме того, как правило, наиболее опасные зоны, определяющие ресурс элемента, являются недоступными для средств неразрушающего контроля. Для гарантированной безопасной эксплуатации ОИО с точки зрения прочности, обоснованного продления их сроков службы за проектные необходимо контролировать темпы развития повреждённости в наиболее опасных зонах конструктивных элементов (выработанный ресурс), а также прогнозировать развитие этих процессов до предельных состояний (остаточный ресурс).

Для осуществления контроля за выработанным и остаточным ресурсом, выявления неиспользованных индивидуальных запасов элементов конструкций по долговечности, снижении степени опасности возникновения внезапных аварийных ситуаций по условиям прочности необходимо прогнозировать развитие повреждённости в опасных зонах оборудования и систем ОИО по фактической истории их термосилового нагружения. Математическое моделирование реальных процессов деградации материала для каждой контролируемой зоны по различным физическим механизмам, соответствующим условиям эксплуатации (малоцикловая усталость (МЦУ), многоцикловая усталость (МнЦУ), длительная прочность (ДП) и т.д.) с учётом их взаимодействия осуществляется с помощью методов и моделей МПС.

Сложность решения проблемы оценки ресурса инженерных объектов тесно связана со сложностью процессов, происходящих в конструкционных материалах в эксплуатационных условиях. Понимание закономерностей этих процессов позволит построить адекватную

математическую модель, которая может служить основой для анализа величины поврежденности материала в опасных зонах конструктивных узлов в зависимости от конкретных параметров кинетики напряженно-деформированного состояния, определяющихся условием эксплуатации объекта, т.е. в конечном итоге, создать теоретическую основу для разработки методов и алгоритмов оценки ресурса объекта в зависимости от индивидуальной истории его эксплуатации [3].

Долгое время исследования в области механики деформируемых сред в основном были направлены на разработку уравнений состояния, описывающих эффекты деформирования для различных процессов истории изменения механической нагрузки и температуры. Стимулом к их разработке, с одной стороны, являлась практическая необходимость оценки напряженно-деформированного состояния элементов конструкций в условиях эксплуатации, а с другой – появление ЭВМ и мощных современных методов решения краевых задач механики сплошных сред, таких как, например, метод конечных элементов (МКЭ), позволяющих определять НДС конструктивных элементов и конструкций в целом практически для любых сложных функциональных зависимостей между тензорами напряжений и деформаций при произвольных сложных режимах термосилового нагружения.

В настоящее время становится актуальной проблема расчетной оценки совместных процессов деформирования и разрушения для ответа на вопрос: где и в какой момент времени при заданной истории изменения нагрузки и температуры в теле впервые, возникнут макроскопические трещины и как эти трещины будут развиваться в дальнейшем? Поскольку процессы накопления повреждений тесно связаны с кинетикой НДС, то точность расчетных оценок прочности и ресурса конструктивных элементов будет зависеть от того, насколько данные уравнения состояния адекватно описывают кинетику НДС в заданных условиях эксплуатации. Такие параметры процесса вязкопластического деформирования, как длина и вид траектории деформирования, вид напряженного состояния, история его изменения и другие, существенно влияют на скорости протекания процессов накопления повреждений. Можно сказать, что в настоящее время развитие уравнений состояния и, в частности, уравнений термопластичности, должно определяться потребностями механики разрушения и должно быть направлено на описание основных эффектов, существенно влияющих на скорости процессов накопления повреждений. Цель исследований в данной области – не столько уточнение различных формулировок, необходимых для определения макроскопических деформаций по заданной истории нагружения, сколько стремление разобраться в основных закономерностях процессов определяющих и подготавливающих разрушение.

Ниже с современных позиций МПС развита математическая модель накопления усталостных повреждений в конструктивных материалах (металлах и их сплавах) при многоосных напряженных состояниях и произвольных сложных траекториях малоциклового нагружения.

Развитый вариант определяющих соотношений используется для оценки усталостной долговечности элементов конструкций при малоцикловых режимах нагружения.

**2. Математическая модель поврежденной среды.** Многолетние экспериментальные и теоретические исследования накопления усталостных повреждений в конструктивных материалах (металлах и их сплавах) позволяют сделать вывод о том, что усталость охватывает две значительно отличающихся друг от друга области циклического нагружения [1, 2, 11]:

– многоцикловую усталость (МнЦУ) при квазиупругой работе материала (пластические деформации в пределах допуска 0,002), соответствующую долговечности при симметричном циклическом одноосном нагружении  $10^5 - 10^8$  циклов;

– малоцикловую усталость (МЦУ) при нестационарном упругопластическом деформировании материала, соответствующую долговечности меньшей  $10^4$  циклов при симметричном циклическом одноосном нагружении.

Область МЦУ представляет собой циклическое нагружение, при котором во время каждого цикла возникают знакопеременные макроскопические пластические деформации. Процесс малоцикловой усталости сопровождается пластической деформацией, циклическим упрочнением (разупрочнением) материала, нелинейной зависимостью «напряжение – деформация». Данная область реализуется в элементах конструкций в зонах высоких температур и конструктивной концентрации напряжений.

Модель повреждённой среды развитая [3–5] состоит из трёх взаимосвязанных частей:

- соотношений, определяющих упругопластическое поведение материала с учётом зависимости от процесса разрушения;
- уравнений, описывающих кинетику накопления повреждений;
- критерия прочности повреждённого материала.

### 2.1. Соотношения термопластичности

Определяющие соотношения термопластичности базируются на следующих основных положениях [3, 8]:

– тензоры деформаций  $e_{ij}$  и скоростей деформаций  $\dot{e}_{ij}$  включают упругие деформации  $e_{ij}^e$ ,  $\dot{e}_{ij}^e$  (не зависящие от истории нагружения и определяющиеся конечным состоянием процесса) и пластические —  $e_{ij}^p$ ,  $\dot{e}_{ij}^p$  (зависящие от истории процесса нагружения);

– начальная поверхность текучести для различных температур описывается поверхностью в форме Мизеса; эволюция изменения поверхности текучести описывается изменением ее радиуса  $C_p$  и перемещением ее центра  $\rho_{ij}$ ;

– изменение объема тела упруго;

– рассматриваются начально изотропные среды; учитывается только анизотропия, вызванная процессами пластического деформирования.

В упругой области связь между шаровыми и девиаторными составляющими тензоров напряжений и деформаций устанавливается с помощью закона Гука:

$$\begin{aligned} \sigma &= 3K[e - \alpha(T - T_0)], \quad \sigma_{ij} = 2Ge_{ij}^e \\ \dot{\sigma} &= 3K[\dot{e} - \alpha\dot{T}] + \frac{\dot{K}}{K}\sigma, \quad \dot{\sigma}'_{ij} = 2G\dot{e}'_{ij} + \frac{\dot{G}}{G}\sigma'_{ij} \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\sigma$ ,  $\dot{\sigma}$ ,  $e$ ,  $\dot{e}$  — шаровые, а  $\sigma'_{ij}$ ,  $\dot{\sigma}'_{ij}$ ,  $e'_{ij}$ ,  $\dot{e}'_{ij}$  — девиаторные составляющие тензоров напряжений  $\sigma_{ij}$ , деформаций  $e_{ij}$  и их скорости  $\dot{\sigma}_{ij}$ ,  $\dot{e}_{ij}$  соответственно;  $T$  — температура;  $T_0$  — начальная температура;  $K(T)$  — модуль объемного сжатия;  $G(T)$  — модуль сдвига;  $\alpha(T)$  — коэффициент линейного температурного расширения материала.

Эффекты монотонного и циклического деформирования в пространстве напряжений учитываются с помощью поверхности текучести, уравнение которой имеет вид:

$$F_s = S_{ij}S_{ij} - C_p^2 = 0, \quad S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}. \quad (2)$$

Для описания сложных циклических режимов деформирования в пространстве напряжений вводится поверхность циклической «памяти». Уравнение поверхности «памяти», позволяющее при расчетах отделить монотонные процессы деформирования от циклических, имеет вид:

$$F_\rho = \rho_{ij}\rho_{ij} - \rho_{\max}^2 = 0, \quad (3)$$

где  $\rho_{\max}$  — максимальный за историю нагружения модуль переменной  $\rho_{ij}$ .

Принимается эволюционное уравнение для радиуса поверхности текучести вида [3–5]:

$$\dot{C}_p = [q_\chi H(F_\rho) + a(Q_s - C_p)\Gamma(F_\rho)]\dot{\chi} + q_3\dot{T}, \quad (4)$$

$$C_p = C_p^0 + \int_0^t \dot{C}_p dt, \quad \dot{\chi} = \left( \frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \right)^{1/2}, \quad \chi_m = \int_0^t \dot{\chi} H(F_\rho) dt, \quad \chi = \int_0^t \dot{\chi} dt, \quad (5)$$

$$q_\chi = \frac{q_2 A \psi_1 + (1-A)q_1}{A\psi_1 + (1-A)}, \quad Q_s = \frac{Q_2 A \psi_2 + (1-A)Q_1}{A\psi_2 + (1-A)}, \quad 0 \leq \psi_i \leq 1, \quad (i=1,2) \quad (6)$$

$$A = 1 - \cos^2 \theta, \quad \cos \theta = n_{ij}^e n_{ij}^s, \quad n_{ij}^e = \frac{\dot{e}_{ij}^p}{(\dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p)^{1/2}}, \quad n_{ij}^s = \frac{S_{ij}}{(S_{ij} S_{ij})^{1/2}}, \quad (7)$$

$$H(F_\rho) = \begin{cases} 1, & F_\rho = 0 \wedge \rho_{ij} \dot{\rho}_{ij} > 0 \\ 0, & F_\rho < 0 \vee \rho_{ij} \dot{\rho}_{ij} \leq 0 \end{cases}, \quad \Gamma(F_\rho) = 1 - H(F_\rho). \quad (8)$$

Здесь  $q_1, q_2, q_3$  — модули изотропного упрочнения, соответствующие монотонным лучевым путям нагружения ( $q_1$ ), излому траектории деформирования на  $90^\circ$  ( $q_2$ ), температурному изменению радиуса поверхности текучести ( $q_3$ );  $a$  — постоянная, определяющая скорость процесса стабилизации формы петли гистерезиса циклического деформирования материала;  $Q_s$  — стационарное значение радиуса поверхности текучести при данных  $\rho_{\max}$  и  $T$ ;  $\chi$  и  $\chi_m$  — длины траекторий пластического деформирования материала при циклическом и монотонном нагружениях;  $C_p^0$  — начальное значение радиуса поверхности текучести.

Первый член уравнения (4) описывает изотропное упрочнение в результате монотонного пластического деформирования ( $H(F_\rho)=1$  и  $\Gamma(F_\rho)=0$ ), второй член — циклическое упрочнение материала ( $H(F_\rho)=0$  и  $\Gamma(F_\rho)=1$ ), а третий — изменение радиуса поверхности текучести при изменении температуры. В целом уравнение (4) описывает локальную анизотропию пластического упрочнения в зависимости от параметра  $A$ , характеризующего отклонение вектора догрузки от нормали к поверхности текучести в точке нагружения. Операторы  $H(F_\rho)$  и  $\Gamma(F_\rho)$  позволяют автоматически провести разделение процессов монотонного и циклического деформирования.

Уравнение для смещения поверхности текучести основано на гипотезе А.А. Ильюшина, заключающейся в том, что упрочнение зависит от истории деформирования лишь на некоторой ближайшей части траектории (запаздывание векторных свойств). Внутренняя переменная  $\rho_{ij}$ , учитывающая анизотропию упрочнения пластического деформирования, удовлетворяет эволюционному уравнению [3–5, 8]:

$$\dot{\rho}_{ij} = g_1 \dot{e}_{ij}^p - g_2 \rho_{ij} \dot{\chi} - g_3 \rho_{ij} < \dot{T} >, \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \quad (9)$$

где  $g_1 > 0$ ,  $g_2 > 0$  и  $g_3 > 0$  — модули анизотропного упрочнения. Первый и второй члены этого уравнения отвечают за анизотропную часть деформационного упрочнения, а третий — за изменение  $\rho_{ij}$  в результате воздействия температуры  $T$ .

Уравнение (9) описывает известный пространственный эффект Баушингера и анизотропию векторных свойств при изменении направления деформирования (изломе

траектории деформирования). Введение второго члена в это соотношение моделирует исчезающую память внутренней переменной  $\rho_{ij}$  (скорость изменения  $\rho_{ij}$  является разностью между двумя составляющими  $g_1 \dot{e}_{ij}^p$  и  $g_2 \rho_{ij} \dot{\chi}$ ).

Для характеристики поведения поверхности «памяти» необходимо сформулировать эволюционное уравнение для  $\rho_{\max}$ :

$$\dot{\rho}_{\max} = \frac{(\rho_{ij} \dot{\rho}_{ij}) H(F_\rho)}{(\rho_{mn} \rho_{mn})^{1/2}} - g_2 \rho_{\max} \dot{\chi} - g_3 \rho_{\max} \langle \dot{T} \rangle. \quad (10)$$

Здесь и далее для любой величины  $\dot{B}$ , заключенной в угловые скобки  $\langle \rangle$ , выполняются

$$\text{условия } \langle \dot{B} \rangle = \begin{cases} \dot{B} & \text{при } \dot{B} > 0 \\ 0 & \text{при } \dot{B} \leq 0 \end{cases}.$$

Компоненты тензора скоростей пластических деформаций подчиняются закону градиентальности вектора скорости пластических деформаций к поверхности текучести в точке нагружения:

$$\dot{e}_{ij}^p = \lambda S_{ij}, \quad (11)$$

где  $\lambda$  — коэффициент пропорциональности, определяемый из условия прохождения новой поверхности текучести через конец вектора девиатора напряжений в конце этапа нагружения.

Материальные параметры, входящие в выражения (4)–(10), находятся из различных экспериментов:

–  $q_1, q_3, g_1, g_2$  и  $g_3$  — из опытов на одноосное растяжение-сжатие цилиндрических трубчатых образцов по специальным циклическим программам испытаний [3];

–  $Q_1$  — из испытаний на блочное циклическое симметричное нагружение с заданной амплитудой деформаций в каждом блоке до стабилизации петли гистерезиса на каждом уровне амплитуд деформаций;

– параметр  $a$  — из условия наилучшей аппроксимации экспериментальных закономерностей стремления  $C_p$  к установившемуся состоянию;

–  $q_2$  — из эксперимента на сложное нагружение: растяжение до некоторого значения  $e_{11}^{p*}$  и последующее кручение с построением траектории напряжений в пространстве  $\sigma_{11} - \sigma_{12}$ .

–  $Q_2$  — из эксперимента на двухблочное циклическое деформирование с одинаковой заданной интенсивностью амплитуды деформаций до стабилизации петли гистерезиса в каждом блоке: первый блок — это симметричное циклическое растяжение-сжатие, второй — последующее циклическое симметричное нагружение образца кручением.

## 2.2. Эволюционные уравнения накопления повреждений

Экспериментальный и теоретический анализ процессов поврежденности материала позволяет представить эволюционное уравнение накопления усталостных повреждений в элементарном объеме материалов в следующем общем виде [3, 6, 7, 9–14]:

$$\dot{\omega} = f_1(\theta) f_2(\beta) f_3(\omega) f_4(Z) \langle \dot{Z} \rangle, \quad (12)$$

где функция  $f_1(\theta)$  описывает влияние кривизны траектории деформирования,  $f_2(\beta)$  вид (объёмность) напряжённого состояния,  $f_3(\omega)$  — уровень накопленной повреждённости,  $f_4(Z)$  накопленную относительную энергию, затраченную на образование дефектов.

Конкретизируя данное соотношение, постулируем, что структура эволюционного уравнения накопления повреждений при усталости имеет вид [3, 6, 9, 10, 12]:

$$\dot{\omega} = \frac{\alpha + 1}{r + 1} f(\beta) Z^\alpha (1 - \omega)^{-r} \langle \dot{Z} \rangle; \quad (13)$$

$$Z = \frac{W - W_a}{(W_f - W_a)}; \quad \langle \dot{Z} \rangle = \begin{cases} \dot{Z} \text{ при } \dot{Z} > 0; \\ 0 \text{ при } \dot{Z} \leq 0; \end{cases} \quad (14)$$

$$\langle \dot{Z} \rangle = \frac{\langle \dot{W} \rangle}{(W_f - W_a)}; \quad \dot{W} = \rho_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p; \quad (15)$$

$$f(\beta) = \exp(-k\beta). \quad (16)$$

В формулах (13)–(16) используются обозначения:  $W_f$  – значение энергии соответствующей образованию макроскопической трещины (параметры материала);  $\alpha$ ,  $r$ ,  $k$  – материальные параметры, зависящие от температуры  $T$ ;  $f(\beta)$  – функция параметра объёмности напряжённого состояния  $\beta = \sigma/\sigma_u$ ;  $W = \int_0^t \dot{W} dt$  – энергия, идущая на образование рассеянных усталостных повреждений при МЦУ;  $W_a$  – значение  $W$  в конце фазы зарождения микродефектов при МЦУ.

Интегрируя уравнение (13) для некоторого заданного процесса нагружения и изменения температуры  $T$  дает уравнение:

$$\omega = 1 - \left[ 1 - Y^{\alpha+1} \right]^{\frac{1}{r+1}}, \quad (17)$$

$$Y = AZ, \quad A = \left[ (\alpha + 1) \int_0^Z f(\beta) Z^\alpha \langle dZ \rangle / Z^{(\alpha+1)} \right]^{\frac{1}{\alpha+1}}. \quad (18)$$

Для регулярных процессов, когда можно выделить регулярные циклы, параметр  $Y$  выражается через относительное число циклов нагружения:

$$Y = N / N_f, \quad (19)$$

а уравнение (17) принимает вид:

$$\omega = 1 - \left[ 1 - \left( \frac{N}{N_f} \right)^{\alpha+1} \right]^{\frac{1}{r+1}}. \quad (20)$$

При  $\alpha = r = 0$  из уравнения (20) получаем широко известное правило линейного суммирования повреждений:

$$\omega = \sum \frac{N}{N_f} = 1. \quad (21)$$

Согласно приведенным уравнениям, каждому процессу, характеризующему своими индивидуальными историями деформирования и изменения температуры  $T$ , на плоскости

переменных  $\omega \sim W$  соответствует своя кривая развития поврежденности, и при изменении режима нагружения происходит переход с одной кривой на другую (принцип нелинейного суммирования повреждений).

На фазовой плоскости  $\omega \sim U$  процессу МЦУ соответствует своя единая обобщенная кривая развития поврежденности, однако скорость движения по этой кривой зависит от текущих параметров процессов деформирования и изменения  $T$ .

Введенная обобщенная энергетическая переменная  $U$  позволяет установить эквивалентность различных процессов поврежденности между собой (для различных видов напряженных состояний, различных температур и различных историй деформирования) и их эквивалентность экспериментальным данным.

Таким образом, уравнение (17) описывает единую кривую накопления повреждений для данного материала при МЦУ. Эта кривая может быть получена из испытаний на усталость лабораторных образцов при симметричном растяжении-сжатии. Обобщенный энергетический параметр  $U$  является «внутренним» временем данных процессов. В этом времени измеряется наработка материала в опасной зоне при усталости и, при необходимости, оно может быть пересчитано в привычное для инженеров количество характерных циклов изменения условий нагружения.

Экспериментальное определение материальных параметров эволюционных уравнений накопления повреждений производится на второй стадии процесса накопления повреждений, с которой начинается влияние поврежденности на физико-механические характеристики материала, при одновременном расчете экспериментальных процессов деформирования на этой стадии с использованием соотношений термопластичности [3]. Метод заключается в том, что все отклонения результатов численного моделирования процессов деформирования без учета влияния поврежденности от экспериментальных на 2-ой стадии приписываются влиянию поврежденности  $\omega$  (уменьшение модуля упругости, падение амплитуды напряжений при постоянной амплитуде деформаций, увеличение амплитуды деформаций при постоянной амплитуде напряжений и т.д.).

Приближенно границы  $W_a$ ,  $W_f$  могут быть определены из испытаний на усталость при заданной амплитуде напряжений или деформаций по моменту начала разупрочнения материала (увеличению амплитуды деформаций или уменьшению амплитуды напряжений соответственно) [3].

### 2.3. Критерий прочности повреждённого материала

В качестве критерия окончания фазы развития рассеянных микроповреждений (стадии образования макротрещины) принимается условие потери устойчивости процесса накопления повреждений: производная  $\partial\omega/\partial y$  достигает своего критического значения:

$$\frac{\partial\omega}{\partial y} = \left( \frac{\partial\omega}{\partial y} \right)_f.$$

Дальнейшее развитие процессов поврежденности зависит от любых случайных факторов, и контролировать эти процессы невозможно.

Численные исследования показали, что условия (28) соответствуют значению поврежденности

$$\omega = \omega_f \cong 0,8.$$

**3. Численные результаты.** С использованием вышеописанной модели механики повреждённой среды численно была решена задача усталостной долговечности компактного образца с затуплённым вырезом при малоцикловом нагружении [15].

Геометрия компактного образца с затупленным вырезом и схема приложения нагрузки приведены на рис. 1. Рассмотрим две истории нагружения (рис. 2). Для двух разных последовательностей начальной нагрузки получаются разные по знаку средние напряжения у выреза при последующем малоцикловом нагружении. Как показывают экспериментальные данные [15], в такой ситуации может наблюдаться большое расхождение величин усталостной долговечности.

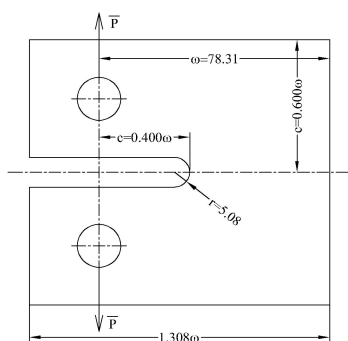


Рис. 1

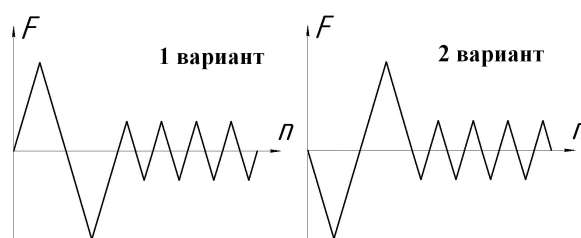


Рис. 2

Уточнённый расчёт данного конструктивного узла проведён в несколько этапов:

1. На первом этапе проводилась оценка кинетики НДС с учётом упругопластического деформирования материала с целью выявления наиболее нагруженных зон.
2. На втором этапе была проведена оценка усталостной долговечности полосы с отверстием с использованием вышеописанных уравнений механики повреждённой среды.

Расчёт НДС полосы с учётом упругопластического поведения материала по модели Шабоша (частный вид уравнений (4) – (11)) был проведён методом конечных элементов по программе ABAQUS [16]. Фрагмент сетки разбиения на конечные элементы для четверти полосы приведён на рис. 3.

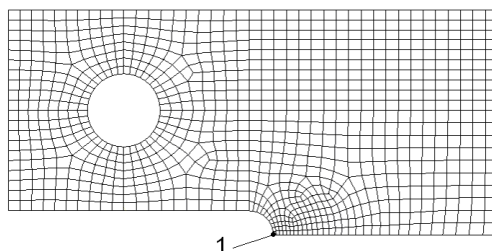


Рис. 3

С целью более точного определения НДС поводилось сгущение сетки элементов в наиболее опасных зонах, где процессы поврежденности наиболее интенсивны. Материал компактного образца – алюминий 2024-T4, физико-механические свойства которого приведены в табл. 1–2.

Физико-механические характеристики алюминия 2024-T4 и материальные параметры модели термопластичности Шабоша приведены в табл. 1–2.



Таблица 1

Физико-механические характеристики и параметры модели алюминия 2024-Т4

характеристики	температура
	20 <sup>0</sup> С
K (МПа)	72900
G (МПа)	27700
E (МПа)	73757
$\alpha$ (1/град)	0,0000166
$C_p^o$ (МПа)	340
$g_1$ (МПа)	23236
$g_2$	358,6
$a$	5

Таблица 2

Работа разрушения  $W_a = W_a(\rho_{\max})$ , алюминия 2024-Т4 при  $T = 20^{\circ}C$ .  $W_f = 1300$  МДж/м<sup>3</sup>,  $\alpha = 1$ ,  $k = 1$ ,  $r = 0,3$ .

$\rho_{\max}$ , МПа	0	15	30	41	51	65	69	72	74	76	78
$W_a$ , МДж/м <sup>3</sup>	1270	1270	1270	1270	1230	1046	945	492	202	66	0

Для проведения упругопластических расчётов каждый блок нагружения разбивался на  $n$  временных шагов (этапов нагружения  $\Delta t = t_{n+1} - t_n$  ( $n=1,2,3,\dots$ )) и для каждого этапа решалась нелинейная задача определения напряжений, полных и пластических деформаций для заданных приращений нагрузки на данном временном этапе. Достаточная сходимость решения и точность расчётных значений напряжений и деформаций достигается выбором соответствующей величины  $\Delta t$ , соответствующей небольшим величинам приращения нагрузки.

На рис. 4 и 5 приведено распределение интенсивности полных и пластических деформаций, а также интенсивности напряжений соответственно в конце ( $n = 2$ ) второго этапа нагружения для двух вышеперечисленных режимов нагружения. Видно, что максимальные значения указанных величин наблюдаются в точке у основания затупленного выреза (наиболее нагруженная зона), где процессы поврежденности проходят с наиболее высокими темпами.

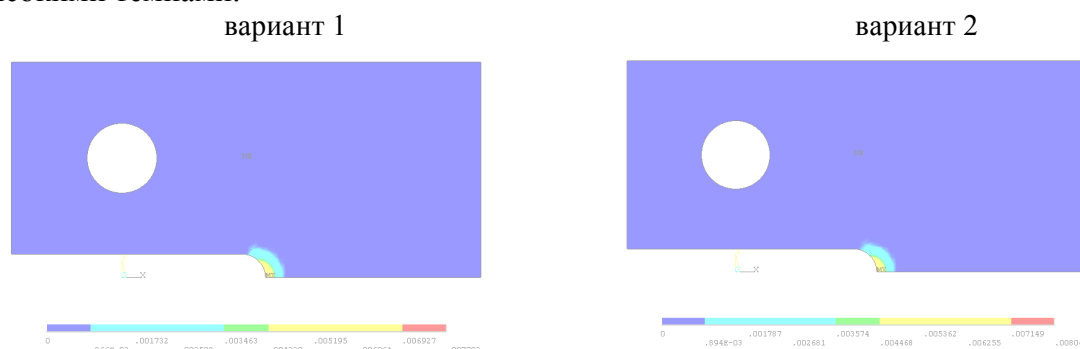


Рис. 4

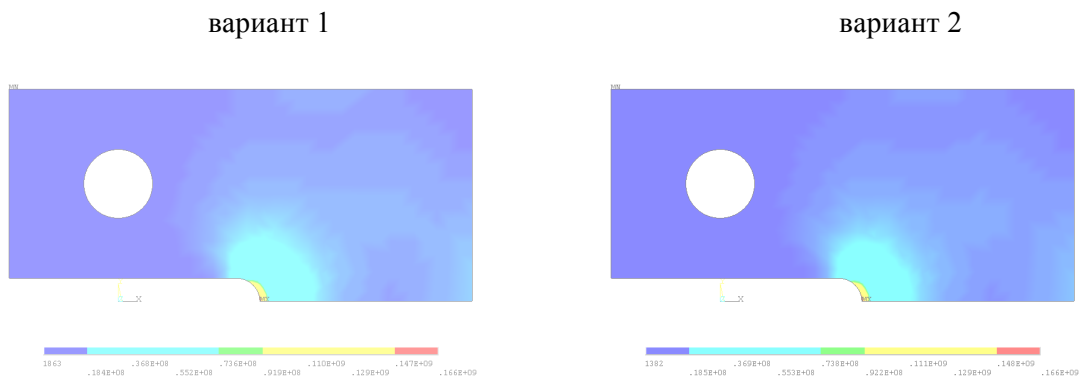


Рис. 5

На рис. 6 для наиболее нагруженной зоны (точка 1) показаны петли гистерезиса для осевого напряжения  $\sigma_{xx}$  и осевой деформации  $e_{xx}$ , рассчитанные для двух вышеотмеченных режимов нагружения (сплошной линией отмечены численные результаты, полученные с использованием вышеописанной модели МПС, а пунктирной – опытные данные [15]). Видно качественное и количественное совпадение экспериментальных и расчетных данных.

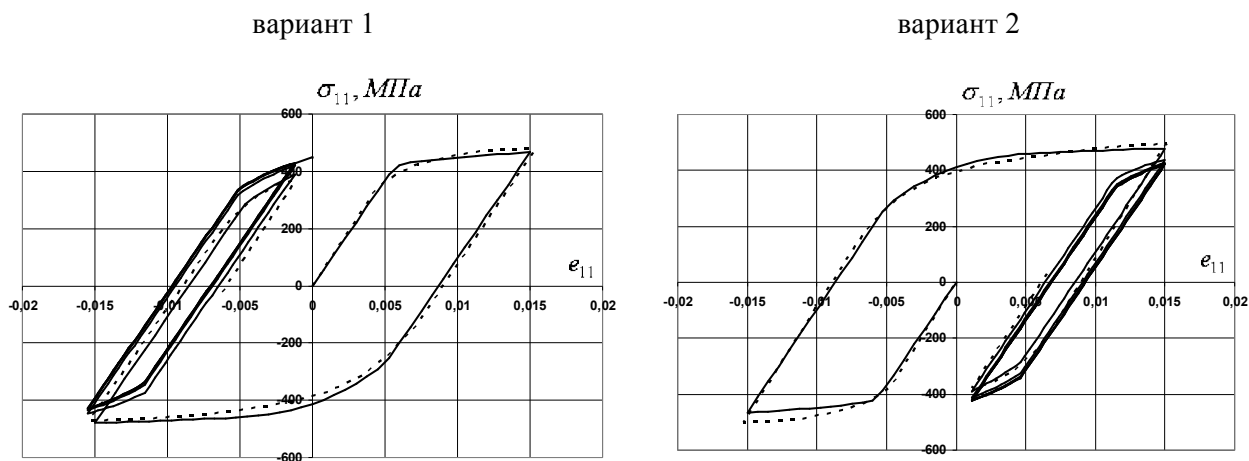


Рис. 6

На рис. 7 для точки 1 представлены зависимости интенсивности тензора напряжений  $\sigma_u$  от интенсивности тензора деформации  $e_u$  (диаграмма сложного деформирования материала) для двух вариантов расчета, характеризующая скалярные свойства материала.

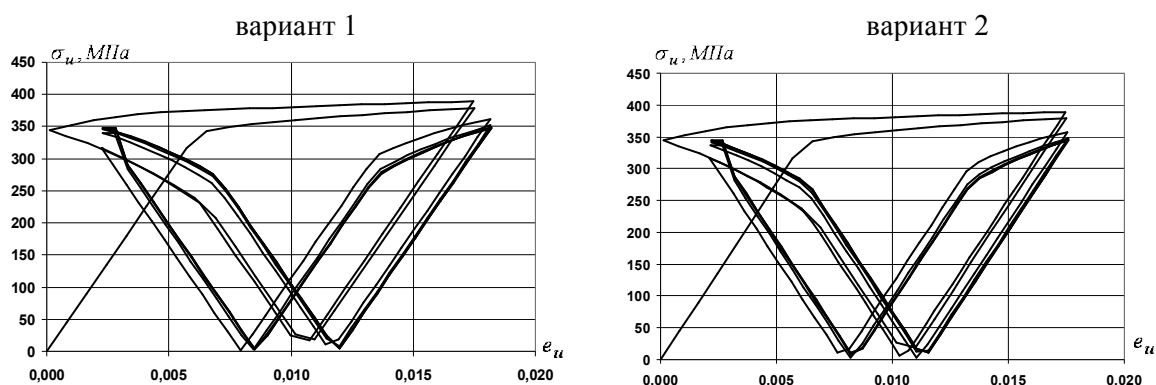


Рис. 7

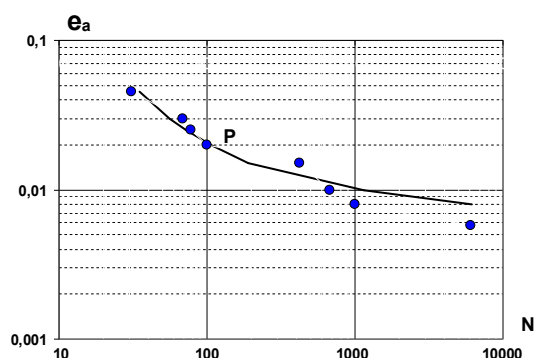


Рис. 8

На рис. 8 приведена кривая усталости для алюминия 2024-T4 (точками обозначены экспериментальные данные). Были проведены численные расчеты усталостной долговечности образцов, выполненных из алюминия 2024-T4, при различных значениях осевой деформации  $\epsilon_{xx}$  при температуре  $T = 20^\circ C$ . Для определения предельной работы  $W_f = 1340$  МДж/м<sup>3</sup> использовалась экспериментальная точка P на усталостной кривой. Результаты сопоставления расчетной (сплошные линии) и экспериментальной (точки) информации показывают, что при известных параметрах уравнений термопластичности (1) – (11) по одной экспериментальной точке P с помощью уравнений (12) – (16) кривая малоциклового усталости для одноосного растяжения – сжатия восстанавливается расчетным путем с высокой точностью.

Интегрирование определяющих соотношений МПС в данной точке материала 1 конструкции позволяет прогнозировать ее усталостную долговечность.

Так, при циклическом нагружении по первому типу, число циклов до разрушения  $N_f = 129$ , а при нагружении по второму типу  $N_f = 165$ .

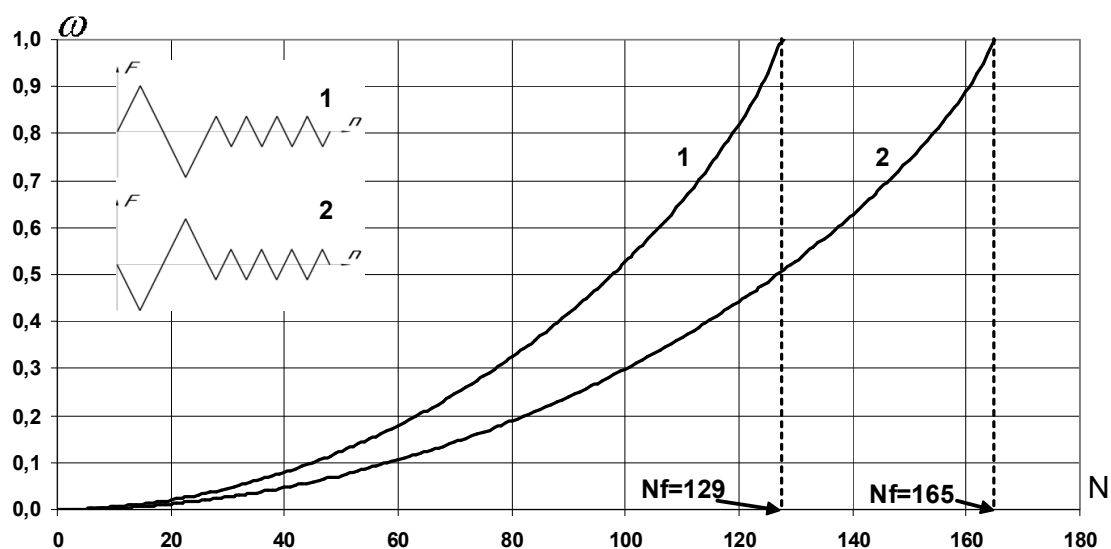


Рис. 9

Следовательно, даже несколько циклов повышенной нагрузки в начале истории нагружения или в процессе работы материала по усталостному механизму могут привести к тому, что правило линейного суммирования повреждений, может дать ошибку, как в консервативную, так и неконсервативную сторону. По-видимому, это объясняется тем, что циклы повышенной нагрузки приводят к возникновению повреждения материала, так, что долговечность оставшимся циклом более низкой нагрузки оказывается меньше ожидаемой.

#### 4. Заключение.

Развита математическая модель МПС, описывающая процессы сложного пластического деформирования и накопления повреждений в материалах и конструкциях при произвольных режимах малоциклового нагружения. Разработанная модель позволяет учесть:

- монотонное и циклическое упрочнение, а также эффекты циклической памяти материала при пропорциональном и непропорциональном деформировании, включая переходные циклические процессы и стабилизированное циклическое поведение материала;
- локальную анизотропию пластического деформирования при изломе траектории деформаций;
- нелинейное суммирование повреждений при изменении условий нагружения и от отдельных механизмов.

Проведена оценка адекватности эволюционных уравнений накопления повреждений путем сопоставления результатов численных расчётов с известными из литературы опытными данными по малоцикловой усталостной долговечности, которые подтверждают правильность моделирования процессов циклического упругопластического деформирования и усталостной долговечности конструкций при малоцикловом нагружении.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-08-00266-а)

### Литература

1. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, подтверждение. М.: Мир, 1984. – 624 с.
2. Трощенко В.Г. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. Киев: Наукова думка, 1981. 342 с.
3. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнение состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М.: Физматлит, 2008. 424 с.
4. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Тарасов И.С. Моделирование сложного пластического деформирования и разрушения металлов при многоосном непропорциональном нагружении. Журнал ПМТФ. Новосибирск: Изд-во Наука, 2009. №5. С. 193–205.
5. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Тарасов И.С. Численное моделирование накопления повреждений при сложном пластическом деформировании. Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. Т. 2, №1. С. 5–19.
6. Пежина. Моделирование закритического поведения и разрушения диссипативного твердого тела. - Теоретические основы инженерных расчетов, т. 106, №4, 1984. С. 107–117.
7. Бойл Дж., Спенс Дж. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести. М., Мир, 1986. 360 с.
8. Chaboche J.L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation. Engineering Design. 64, 1981. P.233–247.
9. Гаруд. Новый подход к расчету усталости при многоосных нагружениях. - Теоретические основы инженерных расчетов, Т.103, №2, 1981. С.41–51.
10. Боднер, Линдхолм. Критерии приращения повреждений для зависящего от времени разрушения материалов. - Теоретические основы инженерных расчетов, № 2, 1976. С. 51–53.
11. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1988. – 279 с.
12. Новожилов В.В. О пластическом разрыхлении. ПММ, 1965, Т. 29, вып. 4.
13. Леметр. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов. - Теоретические основы инженерных расчетов, т. 107, № 1, 1985. С. 90–97.
14. Бернард-Коннолли М., Бью-Куок Т., Бирон А. Усталость коррозионно-стойкой стали 304 при испытаниях в условиях многоступенчатой контролируемой деформации. – Теоретические основы, т. 105, № 3, 1983. С. 47–53.
15. Даулинг Н.Е., Расчёт усталостной долговечности при сложных историях нагружения // Теоретические основы № 3, т. 105, 1983. С. 69–79.
16. SIMULIA Abaqus Example Problems Manual v6.7. – 2008.

*Поступила: 02.12.10.*