УДК 539.3

СООТНОШЕНИЯ МОДЕЛИ ПОВРЕЖДЕННОЙ СРЕДЫ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ПОДВЕРГАЮЩИХСЯ ТЕРМОРАДИАЦИОННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ*)

С.А. Капустин[1], В.А. Горохов[1], О.Ю. Виленский[2], В.Б. Кайдалов[2], А.А. Руин[2]

[1]*НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского*
[2]*ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород*

vas-gor@rambler.ru

Поступила в редакцию 05.09.2012

Предложен вариант модели поврежденной среды для исследования процессов деформирования, разрушения и оценки ресурса конструкций, выполненных из аустенитных сталей, в условиях квазистатических термосиловых и терморадиационных воздействий. Рассмотрены вопросы экспериментального оснащения разработанных моделей необходимыми материальными функциями.

Ключевые слова: терморадиационные воздействия, деформирование, накопление повреждений, разрушение, прочность, численное моделирование.

Введение

Режимы эксплуатации многих сложных и экологически опасных объектов, таких как атомные энергетические установки, характеризуются многопараметрическими нестационарными термосиловыми и терморадиационными воздействиями, приводящими к развитию механизмов деградации начальных прочностных свойств конструкционных материалов и, в конечном итоге, исчерпанию ресурса конструктивных узлов объекта.

Для получения прочностных и ресурсных оценок указанных объектов в настоящее время наиболее перспективными являются методы, основанные на полномасштабном компьютерном моделировании поведения объекта с использованием современных достижений в области механики, вычислительной математики и средств электронно-вычислительной техники. Точность оценок прочности и ресурса конструктивных элементов при использовании в расчетах современных компьютерных моделей определяется, главным образом, адекватностью уравнений состояния, используемых для описания кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС), и их оснащенностью достоверными материальными константами и функ-

*) Выполнено при частичном финансировании Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-2843.2012.8) и при поддержке Министерством образования и науки РФ (соглашения 14.В37.21.1495, 14.В37.21.1902).

циями. Подходы, используемые для достижения этих целей, в отечественных и зарубежных аналогах основываются на упрощающих гипотезах, препятствующих получению с необходимой точностью деформационных и прочностных параметров, соответствующих наступлению предельных состояний.

В статье предложен вариант математической модели накопления повреждений в аустенитных сталях в условиях терморадиационных воздействий с учетом связности процессов деформирования и деградации свойств материала в процессе развивающейся поврежденности. Рассмотрены вопросы экспериментального оснащения разработанных моделей необходимыми материальными функциями.

1. Общие соотношения модели поврежденной среды для описания процессов деформирования и разрушения аустенитных сталей в условиях терморадиационных воздействий

Возможности численного моделирования процессов деформирования и разрушения конструкций при квазистатических термосиловых и терморадиационных нагружениях в значительной мере определяются наличием моделей, позволяющих адекватно описать основные эффекты необратимого деформирования материалов, такие как пластичность, ползучесть, развивающаяся в процессе необратимого деформирования поврежденность, их влияние на процесс деформирования. Поскольку все перечисленные явления представляют собой макроскопические проявления дефектов в структуре материала, развивающихся в нем при действии высоких нагрузок, температур и нейтронного облучения, для их моделирования следовало бы создать единую универсальную модель поврежденного материала, описывающую эффекты необратимого деформирования (пластичности, ползучести) и разрушения на основе единых кинетических уравнений. Однако создание такой модели представляется весьма проблематичным не только для описания всех эффектов поврежденной среды, но и для адекватного описания отдельных эффектов пластичности, ползучести и накопления повреждений в общем случае квазистатического нагружения. Поэтому для создания практических методик, позволяющих на современном уровне моделировать процессы деформирования и разрушения материалов, вместо создания громоздких моделей, описывающих все известные на сегодняшний день эффекты на основе единых кинетических уравнений, более целесообразным оказывается создание некоторой комбинированной модели поврежденного материала, состоящей из более простых, формально независимых частных моделей. Реализация такого подхода для описания процессов деформирования аустенитных сталей в условиях терморадиационных воздействий может быть осуществлена в рамках составной иерархической модели поврежденного материала, предложенной ранее в [1, 2] для моделирования аналогичных процессов при термосиловых нагружениях. При этом в предлагаемой модели, в отличие от ранее созданного варианта, при описании поведения материалов в условиях радиационного облучения учитываются эффекты, обусловленные формоизменением, радиационной ползучестью и зависимостью характеристик прочности и пластичности от параметров радиационного облучения.

При построении варианта модели поврежденного материала предполагалось, что влияние различных видов поврежденности на характеристики процесса деформирования осуществляется с помощью скалярной функции ω (меры поврежденности), представляющей собой меру уменьшения эффективных площадок действия напряжений по отношению к их начальному неповрежденному значению. Величина ω меняется от значения $\omega = 0$ для неповрежденного материала до $\omega = 1$ для полностью разрушенного материала.

Непосредственное влияние поврежденности на процесс деформирования учитывается в уравнениях равновесия путем введения зависимости упругих характеристик материала от текущего значения функции ω. В связи с этим при формулировке составной модели поврежденного материала в рассмотрение введены две характеристики напряжений: эффективные σ_{ij}, действующие на поврежденных площадках, и приведенные σ^*_{ij}, статически эквивалентные первым, но отнесенные к неповрежденным площадкам. Первые фигурируют во всех частных моделях, определяющих состояние материала в точке тела, вторые используются на уровне описания конструкции при формулировке уравнений равновесия и статических граничных условий. Применительно к рассматриваемой в настоящей статье проблеме конкретные уравнения составной модели поврежденного материала, устанавливающие связь между изменениями приведенных напряжений $\Delta\sigma_{ij}$ и деформаций Δe_{ij} на элементарном шаге изменения внешних воздействий, а также параметрами, характеризующими текущее состояние материала, могут быть записаны в виде:

$$\begin{gathered}
\Delta\sigma_{ij} = 2G(\Delta e_{ij} - \Delta d_{ij}) + \delta_{ij}\left(K - \frac{2}{3}G\right)(\Delta e_{ii} - \Delta d_{ii}), \\
\Delta d_{ij} = \Delta e^*_{ij} + \omega(\Delta e_{ij} - \Delta e^*_{ij}), \\
\Delta e^*_{ij} = \Delta e^p_{ij} + \Delta e^c_{ij} + \Delta e^r_{ij} - \frac{\Delta G^* \overline{\sigma}'_{ij}}{2G^*\overline{G}^*} + \delta_{ij}\left[\Delta(\alpha T) + \Delta\beta - \frac{\Delta K^* \overline{\sigma}}{3K^*\overline{K}^*}\right], \\
\Delta G^* = G^* - \overline{G}^*; \quad G^* = (1-\omega)G; \quad \overline{G}^* = (1-\overline{\omega})\overline{G}, \\
\Delta K^* = K^* - \overline{K}^*; \quad K^* = (1-\omega)K; \quad \overline{K}^* = (1-\overline{\omega})\overline{K}, \\
\Delta(\alpha T) = \alpha T - \overline{\alpha}\overline{T}; \quad \Delta\beta = \beta - \overline{\beta},
\end{gathered} \tag{1}$$

где $K = K(T)$, $\overline{K} = K(\overline{T})$, $G = G(T)$, $\overline{G} = G(\overline{T})$ – модули объемной и сдвиговой деформации неповрежденного материала, отнесенные к уровню температур в исходном (в начале шага) и текущем (в конце шага) состояниях; $\alpha = \alpha(T, D)$, $\overline{\alpha} = \alpha(\overline{T}, \overline{D})$ – значения коэффициентов температурного расширения; $\beta, \overline{\beta}$ – значения деформации радиационного распухания; $\overline{\sigma}'_{ij}$, $\overline{\sigma}$ – значения девиаторных и шаровой составляющих тензора напряжений в исходном состоянии.

Фигурирующие в (1) величины изменения пластических деформаций Δe^p_{ij}, деформаций термической Δe^c_{ij} и радиационной Δe^r_{ij} ползучести, описываемые соответствующими частными моделями, однозначно определяются уровнями эффективных напряжений σ_{ij}, температур T, повреждающей дозой облучения D в исходном и текущем состояниях, а также наборами скалярных и тензорных параметров $b^p_q (q = 1,2..,l)$, $b^c_t (t = 1,2..,m)$, являющихся функционалами процесса и характеризующих истории упругопластического деформирования и ползучести соответственно

$$\begin{gathered}
\Delta e^p_{ij} = \Delta e^p_{ij}(\sigma_{ij}, T, D, b^p_q), \\
\Delta e^c_{ij} = \Delta e^c_{ij}(\sigma_{ij}, T, \dot{D}, b^c_t, \Delta t).
\end{gathered} \tag{2}$$

Здесь $\dot{D} = dD/dt$ – скорость набора повреждающей дозы, Δt – временная протяженность текущего шага нагружения.

Определяющие соотношения в этих моделях записываются для неповрежденного материала и формально не включают в себя какой-либо зависимости от текущей поврежденности. Влияние последней проявляется лишь через уровень зависящих от ω эффективных напряжений σ_{ij} и параметров b_q^p и b_t^c, являющихся функционалами исследуемого процесса. Конкретные соотношения частных моделей, описывающих упруговязкопластическое поведение нержавеющих сталей в условиях терморадиационных воздействий, и материальные функции, необходимые для реализации этих моделей, приведены в [3, 4].

При описании накопления повреждений в материале конструкций предполагается, что в процессе его деформирования могут независимо развиваться несколько различных видов поврежденности, характеризуемых соответствующими функциями поврежденности Ψ_k ($k = 1, 2, ..., l$). Предполагается также, что изменение поврежденности $\Delta\Psi_k$ каждого вида определяется уровнем действующих напряжений σ_{ij}, температуры T, повреждающей дозой D, изменением необратимых деформаций Δe_{ij}^H, значением некоторых параметров $b_{ks}^r (s = 1,2,..., p)$ (в случае пластичности $\Delta e_{ij}^{H'} = \Delta e_{ij}^p, b_{1s}^r \subset b_q^p$, в случае ползучести $\Delta e_{ij}^{H'} = \Delta e_{ij}^c$, $b_{2s}^r \subset b_t^c$), характеризующих историю упруговязкопластического деформирования, а также значением накопленной поврежденности Ψ_k данного вида и константами материала W_k^R:

$$\Delta\Psi_k = \Delta\Psi_k(\sigma_{ij}, T, D, \Delta e'_{ij}, b_{ks}^r, \Psi_k, W_k^R). \tag{3}$$

Вклад поврежденности каждого вида в изменение меры поврежденности $\Delta\omega_k$ представляется в виде

$$\Delta\omega_k = \Delta\omega_k\left(\Delta\Psi_k, \overline{\omega}, q_k^\beta\right), \tag{4}$$

где $\overline{\omega}$ – накопленное значение функции ω; q_k^β – некоторые константы материала.

Вычисление изменений функций поврежденности $\Delta\Psi_k$ и вклада их в изменение меры поврежденности $\Delta\omega_k$ осуществляется в соответствующих частных моделях поврежденности. Полное значение меры ω, соответствующее текущему состоянию, вычисляется в составной модели на основе принятого алгоритма суммирования повреждений.

2. Накопления повреждений в аустенитных сталях в условиях терморадиационных воздействий

В основу соотношений, используемых для описания процессов накопления повреждений в рамках предлагаемой модели поврежденного материала, положено предположение о том, что разрушение в точке материала происходит при достижении в этой точке некоторой энергией W критического значения $W = W^R$. Конкретный вид этой энергии определяется механизмом рассматриваемого разрушения и представляет собой работу некоторой части тензора напряжений на необратимых деформациях. При этом предполагается, что для каждого конкретного материала величина W^R, соответствующая выбранному механизму разрушения, зависит от реализуемого вида НДС, температуры T и повреждающей дозы D. Таким образом, разрушение представляется как процесс, характеризуемый изменением энергии разрушения W от значения $W = 0$ для неповрежденного материала до $W = W^R$ для полного разрушения материала в рассматриваемой точке.

Поскольку величина W^R зависит от материала, вида НДС, температуры и уровня облучения, для описания текущего состояния поврежденности вместо энергии

W удобнее ввести в рассмотрение функцию Ψ (функцию поврежденности), представляющую собой нормированный аналог энергии W. Для неповрежденного материала $\Psi = 0$, в процессе разрушения значение Ψ увеличивается до предельного значения $\Psi = 1$.

Изменение функции поврежденности $\Delta\Psi$ связано с изменением энергии ΔW при фиксированном виде НДС соотношением

$$\Delta\Psi = \frac{\Delta W}{W^R(\Pi)}. \tag{5}$$

В качестве параметра, определяющего вид НДС, используется величина П, которая выражается через главные напряжения σ_1, σ_2 и σ_3 в точке тела с помощью зависимости [2]:

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{3(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)}}. \tag{6}$$

При развитии в материале одновременно нескольких видов повреждений для описания каждого вида используется своя функция $\Delta\Psi_k$, причем для каждой функции справедливо условие линейного суммирования

$$\Psi_k = \sum_{i=1}^{n} \Delta\Psi_{ki} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta W_{ki}}{W_k^R(\Pi)}, \tag{7}$$

где ΔW_{ki} – изменение энергии k-го вида на элементарном шаге изменения нагрузки, W_k^R – критическое значение энергии k-го вида.

Как указывалось ранее, для описания влияния текущего уровня поврежденности на характеристики процесса деформирования в рассматриваемой модели поврежденного материала вводится скалярная мера поврежденности ω. Величина ω рассматривается как величина, инвариантная по отношению к виду поврежденности, виду НДС и траекториям нагружения, причем ее изменение складывается из изменений меры поврежденности каждого вида $\Delta\omega_k$, то есть

$$\Delta\omega = \sum \Delta\omega_k. \tag{8}$$

Изменение меры поврежденности каждого вида $\Delta\omega_k$, в свою очередь, связано с накопленным значением $\overline{\omega}$, а также с изменением функции поврежденности соответствующего вида $\Delta\Psi_k$. Для установления такой связи прежде всего необходимо установить особенности развития накопления повреждений в реальных материалах.

В соответствии с известными экспериментальными и теоретическими фактами процесс развития дефектов в объеме тела, приводящий к его полному разрушению, можно условно представить состоящим из двух фаз: фазы зарождения рассеянных повреждений и фазы их взаимодействия и дальнейшего развития.

Учет наличия названных фаз при описании накопления повреждений в предлагаемой модели осуществляется по аналогии с моделями, описанными в [2], путем введения переменной, определяющей завершение первой фазы. В качестве такой переменной используется величина Ψ_k^a, определяемая для каждого k-го вида поврежденности значением упомянутой выше функции поврежденности в конце первой фазы. При этом зависимость изменения меры поврежденности $\Delta\omega_k$ от изменения функции поврежденности $\Delta\Psi_k$ принимается в виде [2]:

$$\Delta\omega_k = q_k \cdot \overline{\omega}^{(q_k - 1)/q_k} \Delta\Psi_k^0,$$

$$\Delta\Psi_k^0 = \frac{\Delta\Psi_k}{1 - \Psi_k^a} \text{ при } \Psi_k > \Psi_k^a,$$

$$\Delta\Psi_k^0 = 0 \text{ при } \Psi_k \le \Psi_k^a, \qquad (9)$$

где $q_k = q_k(T, D)$ – функция материала.

Конкретные соотношения, определяющие вид функций поврежденности Ψ_k, устанавливаются для каждого вида разрушения на основе следующих частных моделей:

– модели накопления повреждений в материале при пластическом деформировании;

– модели накопления повреждений при термической ползучести;

– модели хрупкого разрушения облучаемых материалов.

3. Кинетические уравнения накопления повреждений при пластическом деформировании

Ввиду сложности проведения соответствующих экспериментов материальные функции, определяющие параметры анизотропного упрочнения в моделях пластичности в [3, 4], строятся на основе некоторых умозрительных предположений, то есть не являются строго объективными. Кроме этого, конструкции, работающие в условиях радиационного облучения, обычно находятся в условиях высоких температур, при которых анизотропное упрочнение материалов исчезает. Поэтому в качестве «опасной» энергии, используемой для описания процесса накопления повреждений в материалах, в условиях пластического деформирования принимается не энергия пластического разрыхления [1, 2, 5], зависящая от тензора остаточных микронапряжений ρ_{ij}, а часть энергии диссипации, определяемая работой пластических деформаций на компонентах тензора упрочнения a_{ij} [5]:

$$W_1 = \int_0^{e^p} a_{ij} de_{ij}^p. \qquad (10)$$

Величина изменения этой энергии ΔW_1 на элементарном шаге изменения внешних воздействий определяется изменением пластических деформаций Δe_{ij}^p и текущим значением тензора упрочнения a_{ij} [5]:

$$\Delta W_1 = \langle \Delta W \rangle = \langle a_{ij} \cdot \Delta e_{ij}^p \rangle, \qquad (11)$$

где

$$\langle \Delta W \rangle = \begin{cases} \Delta W \text{ при } \Delta W > 0, \\ 0 \text{ при } \Delta W \le 0. \end{cases}$$

Также принимается, что разрушение материала ($\omega = 1$) происходит при достижении энергией пластического разрыхления некоторой фиксированной величины W_1^R, зависящей от температуры T, повреждающей дозы D и реализуемого вида НДС [2]:

$$W_1^R = f^p(\Pi) \cdot W_{01}^R(T, D), \qquad (12)$$

где $W_{01}^R(T, D)$ – предельная энергия пластического разрыхления при одноосном растяжении, $f^p(\Pi)$ – функция вида НДС ($0 \le f^p(\Pi) < \infty$), определяемая на основе аппроксимации, полученной из экспериментов по определению зависимости W_1^R от вида НДС.

С учетом упомянутых выше стадий накопления повреждений изменение функции поврежденности $\Delta\Psi_1^0$ может быть представлено в виде:

$$\Delta\Psi_1^0 = \frac{\Delta\Psi_1}{1-\Psi_1^a} \text{ при } \Psi_1 > \Psi_1^a, \quad \Delta\Psi_1^0 = 0 \text{ при } \Psi_1 \le \Psi_1^a, \tag{13}$$

где

$$\Delta\Psi_1 = \frac{\Delta W_1}{W_1^R}, \tag{14}$$

$\Psi_1^a = \Psi_1^a(T, D, a_c)$; $a_c = \sqrt{(2/3)\cdot a_{ij}\cdot a_{ij}}$ – второй инвариант тензора упрочнения.

Изменение меры поврежденности $\Delta\omega_1$ определяется на основе соотношения (9), причем для определения полного значения ω используется линейное правило суммирования повреждений:

$$\Delta\omega_1 = q_1\overline{\omega}^{(q_1-1)/q_1}\Delta\Psi_1^0, \quad \omega = \overline{\omega} + \Delta\omega_1, \tag{15}$$

где $\overline{\omega}$ – накопленное значение функции ω, $q_1 = q_1(T, D)$ – функция материала.

Таким образом, материальными функциями модели могут служить величины $W_{01}^R(T,D)$, $q_1(T,D)$, $\Psi_1^a(T,D,a_c)$.

Для определения функций $W_{01}^R(T,D)$, $q_1(T,D)$ можно использовать результаты испытаний деформирования образцов до их разрушения в условиях одноосного растяжения для ряда фиксированных значений температур и повреждающих доз облучения. При этом предварительно должны быть получены необходимые материальные функции термопластичности.

Дальнейшие действия описываются алгоритмом:

1) на основе результатов одноосного разрушения образца определяется предельное значение пластической деформации e_1^R; с диаграммы деформирования снимается зависимость приведенного напряжения $\sigma_1^*(e_1^p)$ от пластической деформации e_1^p;

2) на основе численного моделирования процесса деформирования фрагмента рабочей части образца в условиях однородного жесткого одноосного растяжения с использованием полученных материальных функций термопластичности определяются:

– зависимость эффективных напряжений σ_1 и энергии пластического разрыхления W_1 от пластической деформации e_1^p,

– предельное значение энергии пластического разрыхления W_{01}^R, соответствующее деформации $e_1^p = e_1^R$;

3) для ряда значений e_1^p на основе полученных из эксперимента приведенных напряжений σ_1^* и полученных в результате численного моделирования эффективных напряжений σ_1 вычисляются текущие значения мер поврежденности $\omega(e_1^p)$:

$$\omega(e_1^p) = \frac{\sigma_1 - \sigma_1^*}{\sigma_1}; \tag{16}$$

4) для выбранных значений e_1^p вычисляются значения функции поврежденности $\Psi_1(e_1^p)$ и в предположении, что при монотонном нагружении $\omega = \Psi_1^{q_1}$, значения параметров $q_1(e_1^p)$:

$$\Psi_1(e_1^p) = \frac{W_1}{W_{01}^R}; \quad q_1(e_1^p) = \frac{\ln\omega}{\ln\Psi_1}, \tag{17}$$

где $W_1 = W_1(e_1^p)$ – энергия разрыхления, полученная на основе результатов численного моделирования;

5) на основе зависимости $q_1(e_1^p)$ в зоне заметного влияния ω на уровень эффективных напряжений выбирается значение $q_1(e_1^p) = \text{const}$;

6) с учетом полученных значений W_{01}^R и q_1 проводится численное моделирование процесса разрушения экспериментального образца и уточняются значения W_{01}^R и q_1;

7) при необходимости жестко задать начало второй стадии накопления повреждений и лучшей аппроксимации экспериментальной кривой расчетной определяется амплитудное значение функции поврежденности $\Psi_1^a(a_c)$.

Представленные операции осуществляются для других значений температур и повреждающих доз. В результате строятся зависимости $W_{01}^R(T, D)$, $q_1(T, D)$ и $\Psi_1^a(T, D, a_c)$.

4. Кинетические уравнения накопления повреждений в условиях термической ползучести

В качестве переменной, определяющей процесс накопления повреждений при термической ползучести, принимается соответствующая доля энергии диссипации, изменение которой на шаге нагружения может быть записано в виде [1, 2]:

$$\begin{gathered} \Delta W_2 = \sigma'_{ij} \cdot \Delta e_{ij}^c, \\ \Delta\Psi_2 = \frac{\Delta W_2}{W_2^R}, \end{gathered} \tag{18}$$

где $W_2^R = W_2^R(\Pi, T, D)$ – предельное значение энергии диссипации при ползучести, соответствующее текущему виду НДС, действующей температуре, повреждающей дозе.

Зависимость функции W_2^R от вида НДС, температуры и повреждающей дозы можно записать по аналогии с пластичностью:

$$W_2^R = f^c(\Pi) \cdot W_{02}^R(T, D), \tag{19}$$

где $W_{02}^R(T, D)$ – предельное значение энергии диссипации ползучести при одноосном растяжении, $f^c(\Pi)$ – функция вида НДС $(0 \le f^c(\Pi) < \infty)$, определяемая на основе аппроксимации, полученной из экспериментов по нахождению зависимости W_2^R от вида НДС.

Зависимость изменения меры поврежденности $\Delta\omega_2$ от изменения функции поврежденности $\Delta\Psi_2$ принимается в виде:

$$\Delta\omega_2 = q_2 \cdot \overline{\omega}^{(q_2-1)/q_2} \Delta\Psi_2^0,$$

$$\Delta\Psi_2^0 = \Delta\Psi_2 / (1 - \Psi_2^a) \ \text{ при } \ \Psi_2 > \Psi_2^a,$$

$$\Delta\Psi_2^0 = 0 \text{ при } \Psi_2 \le \Psi_2^a, \tag{20}$$

где $q_2 = q_2(T, D)$ – функция материала; $\Psi_2^a = \Psi_2^a(T, D, \theta)$; $\theta = (|\sigma'_{ij}| - C_0)/C_0$ ($C_0(T)$ – радиус поверхности ползучести).

Таким образом, материальными функциями модели могут служить величины $W_{02}^R(T,D)$, $q_2(T,D)$, $\Psi_2^a(T,D,\theta)$.

Для определения функций $W_{02}^R(T, D)$ и $q_2(T,D)$ нужно использовать результаты испытаний деформирования образцов на ползучесть при фиксированном уровне напряжений до их разрушения в условиях одноосного растяжения для ряда фиксированных значений температур и повреждающих доз облучения. При этом предварительно должны быть получены необходимые материальные функции термоползучести.

Дальнейшие действия описываются алгоритмом:

1) на основе результатов одноосного разрушения образца определяется предельное значение деформации ползучести e_1^{cR}; с диаграммы ползучести снимается зависимость деформации ползучести e_1^c от времени ползучести t;

2) на основе численного моделирования процесса деформирования фрагмента рабочей части образца в условиях однородного одноосного растяжения с использованием полученных материальных функций термоползучести определяются:

– зависимость эффективных напряжений σ_1 и энергии диссипации при ползучести W_2 от времени ползучести t,

– предельное значение энергии диссипации при ползучести W_{02}^R, соответствующее времени до разрушения $t = t^R$;

3) для ряда значений времени ползучести t на основе заданного в эксперименте приведенного напряжения σ_1^* и полученных в результате численного моделирования эффективных напряжений σ_1 вычисляются текущие значения мер поврежденности

$$\omega(t) = \frac{\sigma_1 - \sigma_1^*}{\sigma_1}; \tag{21}$$

4) для выбранных значений t вычисляются значения функции поврежденности $\Psi_2(t)$ и значения параметров $q_2(t)$ в предположении, что при данных условиях эксперимента $\omega = \Psi_2^{q_2}$:

$$\Psi_2(t) = \frac{W_2}{W_{02}^R}, \quad q_2(t) = \frac{\ln\omega}{\ln\Psi_2}, \tag{22}$$

где $W_2 = W_2(t)$ – энергия диссипации при ползучести, полученная на основе результатов численного моделирования;

5) на основе зависимости $q_2(t)$ в зоне заметного влияния ω на уровень эффективных напряжений выбирается значение $q_2(t) = \text{const}$;

6) с учетом полученных значений W_{02}^R и q_2 проводится численное моделирование процесса разрушения экспериментального образца и уточняются значения W_{02}^R и q_2;

7) при необходимости жестко задать начало второй стадии накопления повреждений (соответствующей третьей стадии ползучести) и лучшей аппроксимации экспериментальных кривых расчетными при различных уровнях напряжений, определяемых параметром θ, задается амплитудное значение функции поврежденности $\Psi_2^a(\theta)$.

Представленные операции осуществляются для других значений температур и повреждающих доз. В результате строятся зависимости $W_{02}^{R}(T,D)$, $q_2(T,D)$ и $\Psi_2^{a}(T,D,\theta)$.

5. Моделирование хрупких повреждений

Описание эффектов хрупкого разрушения строится на основе кинетического уравнения для изменения меры поврежденности $\Delta\omega_3$ [1, 5], позволяющего представить развитие эффектов хрупкого разрушения как квазистационарный процесс, определяемый соотношениями:

$$\begin{gathered}\Delta\omega_3 = 0 \text{ при } \sigma_1 < \sigma_0^R, \sigma_3 > \sigma_0^S, \\ \Delta\omega_3 = C\frac{1-\omega}{\sigma_1}(\sigma_1 - \sigma_0^R) \text{ при } \sigma_1 > \sigma_0^R\end{gathered} \tag{23}$$

или

$$\Delta\omega_3 = C\frac{1-\omega}{\sigma_3}(\sigma_3 - \sigma_0^S) \text{ при } \sigma_3 < \sigma_0^S, \tag{24}$$

где σ_1 и σ_3 – значения главных напряжений (эффективных напряжений), $\sigma_0^R = \sigma_0^R(T,D)$, $\sigma_0^S = \sigma_0^S(T,D)$ – разрушающие значения эффективных напряжений при одноосном растяжении и сжатии соответственно; C – регуляризационный параметр, выбираемый из условия удовлетворительной сходимости схемы «релаксации состояния» [5], заключающейся в итерационном уточнении текущего значения меры поврежденности и эффективного напряжения σ_1 (или σ_3), соответствующих равновесному состоянию конструкции.

Приведенный вариант модели основан на критерии максимальных нормальных напряжений и предположении о том, что при выполнении этого критерия полное разрушение материала в рассматриваемой точке (соответствующее условию $\omega = 1$) происходит не мгновенно, а в результате некоторого процесса слияния микродефектов.

Материальные функции модели $\sigma_0^R(T,D)$ и $\sigma_0^S(T,D)$ являются пределами прочности на растяжение и сжатие соответственно. Величина предела прочности на растяжение (приведенное значение) для заданного значения температуры T и повреждающей дозы D снимается с диаграммы одноосного растяжения образца, а затем пересчитывается в эффективное значение σ_0^R. Для получения σ_0^S необходимо провести эксперимент по одноосному сжатию образца до разрушения.

По результатам экспериментов, проводимых для различных значений температур и повреждающих доз, можно получить необходимые зависимости $\sigma_0^R(T,D)$ и $\sigma_0^S(T,D)$.

Заключение

Предложен вариант модели поврежденной среды для исследования процессов деформирования, разрушения и оценки ресурса конструкций, выполненных из аустенитных сталей, в условиях квазистатических термосиловых и терморадиационных воздействий. Рассмотрены вопросы экспериментального оснащения разработанных моделей необходимыми материальными функциями.

Список литературы

1. *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.

2. *Капустин С.А.* Метод конечных элементов в задачах механики деформируемых тел: Учеб. пособие. Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. 180 с.

3. Численное моделирование процессов деформирования изделий из нержавеющих сталей в условиях терморадиационных воздействий / В.А. Горохов, С.А. Капустин, Ю.А. Чурилов и др. // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб / Нижегород. ун-т. 2005. Вып. 67. С. 26–36.

4. Моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций из нержавеющих сталей, эксплуатирующихся в условиях интенсивных терморадиационных воздействий / С.А. Капустин, В.А. Горохов, О.Ю. Виленский и др. // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2007. Вып. 69. С. 106–116.

5. *Капустин С.А.*, *Чурилов Ю.А.*, *Горохов В.А.* Численное моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций в условиях квазистатических термосиловых и терморадиационных воздействий // Современные проблемы ресурса материалов и конструкций: Тр. III школы-семинара. М.: МАМИ, 2009. С. 90–104.

RELATIONS OF THE DAMAGED MEDIUM MODEL FOR MATERIALS SUBJECTED TO THERMAL-RADIATION LOADING

S.A. Kapustin, V.A. Gorokhov, O.Yu. Vilenskiy, V.B. Kaidalov, A.A. Ruin

The authors propose a version of the damaged medium model to study the processes of deformation, failure, and life assessment of structures made of austenitic steels under quasi-static subjected to thermal-stress and thermal-radiation loading. The issues of experimentally equipping the developed models with necessary material functions are considered.

Keywords: thermal-radiation loading, strain, damage accumulation, failure, strength, numerical simulation.