

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-3-345-358

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ
С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ***

© 2019 г. **Антипов А.А.¹, Горохов В.А.², Егунов В.В.²,
Казаков Д.А.², Капустин С.А.², Чурилов Ю.А.²**

*¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация*

*²Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

vas-gor@rambler.ru

Поступила в редакцию 24.06.2019

Разработана методика численного исследования на основе метода конечных элементов процессов деформирования и накопления повреждений в элементах конструкций из жаропрочных сплавов в условиях высокотемпературной ползучести с учетом влияния нейтронного облучения. Описание механического поведения материала осуществляется в рамках разработанных ранее общей модели поврежденного материала и модели ползучести для необлученных жаропрочных сплавов, дополненных учетом влияния облучения на скорость ползучести и появления эффекта хрупкого разрушения в заданном диапазоне изменения температур и интенсивности облучения. Определяющие соотношения модели ползучести облучаемого материала получены модификацией модели ползучести необлученного материала: введены материальные функции, учитывающие влияние флакса нейтронов на скорость деформации термической ползучести, на радиус поверхности ползучести, на предельное значение энергии диссипации при ползучести. Для моделирования процессов хрупкого разрушения при ползучести в условиях нейтронного облучения принимается допущение о том, что разрушающие значения эффективных нормальных напряжений являются функциями температуры, флакса нейтронов и текущего значения накопленной деформации ползучести. Материальные функции модели получены по результатам проведенных в НИИ механики базовых экспериментов для рассматриваемого жаропрочного сплава без облучения и имеющимся экспериментальным данным по исследованию ползучести этого сплава при его облучении. На основе предложенной модели разработана и реализована в рамках вычислительного комплекса УПАКС численная мето-

* Выполнено при поддержке грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований молодых российских ученых – докторов наук (грант МД-2528.2019.1).

дика решения задач высокотемпературной ползучести конструкций из жаропрочных сплавов в условиях нейтронного облучения. Для верификации и иллюстрации возможностей разработанных методических и программных средств решен ряд задач моделирования процессов высокотемпературной ползучести и разрушения элементов конструкций, изготовленных из рассматриваемого жаропрочного сплава.

Ключевые слова: ползучесть, высокотемпературное нагружение, нейтронное облучение, накопление повреждений, метод конечных элементов.

Введение

Практически все материалы при различных температурах в той или иной степени обладают свойствами ползучести. Конструкционные материалы проявляют эффект ползучести в определенном диапазоне напряжений и температуры. Для металлов учет ползучести становится необходим в условиях высоких температур. Особенности деформирования материалов в условиях ползучести посвящено большое количество книг, монографий и обзорных статей [1–11]. Анализ публикаций об экспериментальном изучении ползучести материалов говорит о существенном влиянии на результаты исследований таких факторов, как: форма и размер поперечного сечения образцов; предварительное пластическое деформирование материала; вид напряженного состояния; добавление к статическому напряжению вибрационного напряжения (виброползучесть); наличие в материале микронеоднородностей; воздействие агрессивных сред.

В пятидесятых годах XX века Л.М. Качанов и Ю.Н. Работнов заложили основы подхода механики поврежденной среды к описанию процессов ползучести и разрушения, в котором вводится параметр поврежденности ω , описывающий состояние материала от первоначально неповрежденного ($\omega = 0$) до полностью разрушенного ($\omega = 1$) [1, 2]. В публикациях [12–14] проведен аналитический обзор результатов, полученных с помощью подходов Ю.Н. Работнова и Л.М. Качанова в процессах разрушения в условиях ползучести с применением скалярной и тензорной мер поврежденности. В [15, 16] авторы рассматривают процессы ползучести и разрушения как два взаимно влияющих друг на друга процесса. В качестве меры интенсивности процесса ползучести принимается величина удельной мощности рассеяния. Для описания третьего участка ползучести в [17] сформулированы соотношения для энергии, ответственной за разрушение при ползучести, и кинетические уравнения, описывающие изменение меры поврежденности ω в процессе деформирования и накопления повреждений. Различные варианты модификаций модели (и их апробации на экспериментальных данных) ползучести, сформулированной в [17], представлены в [18–22]. В статьях [11, 23] предлагается вариант теории ползучести и длительной прочности, основанной на концепции разрыхления. Отдельные результаты по развитию и применению вычислительных моделей распространения трещин в элементах конструкций в условиях ползучести отражены в [24–28]. Развитие модели ползучести [17] для исследования процессов ползучести нержавеющей стали в условиях терморadiационных воздействий выполнено в статьях [29, 30]. В [31] предложена физико-механическая модель, которая описывает разрушение материалов, подвергающихся нейтронному облучению в условиях ползучести. Физико-механическая модель разрушения [31] в статье [32] применена для прогнозирования длительной прочности и пластичности стали 1X18H10T в исходном и облучае-

мом состояниях. Инженерный подход прогнозирования скорости роста трещины в аустенитных материалах в условиях нейтронного облучения и ползучести на основе модели разрушения [31] предложен в [33].

В настоящей статье представлено описание численной методики для исследования на основе метода конечных элементов (МКЭ) процессов деформирования и накопления повреждений в элементах конструкций из жаропрочных сплавов в условиях высокотемпературной ползучести с учетом влияния нейтронного облучения. Работоспособность методики подтверждена результатами численного решения задач и их сравнением с экспериментальными данными.

1. Методика численного исследования высокотемпературной ползучести элементов конструкций

Описание поведения материалов по предлагаемой методике осуществляется аналогично представленной в [18, 19] общей модели поврежденного материала с использованием предложенной в [19] модели термоползучести для необлученных жаропрочных сплавов, дополненной учетом влияния эффектов облучения рассматриваемых материалов в заданном диапазоне изменения температур и интенсивности облучения.

При определении основных эффектов нейтронного облучения таких сплавов принималось, что в отличие от поведения хромоникелевых сталей при терморационных воздействиях в условиях работы ядерных энергетических установок [29, 30] для указанных сплавов, согласно известным экспериментальным данным, в рассматриваемом диапазоне изменения температур и интенсивности облучения наиболее значимое влияние облучения проявляется лишь в заметном изменении скорости термической ползучести и появлении эффектов хрупкого разрушения в процессе ползучести.

В настоящем исследовании для описания скорости деформаций ползучести $\dot{\epsilon}_{ij}^{\Phi}$ использована модель ползучести необлученного материала [18, 19], дополненная учетом влияния облучения:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{\Phi} = \dot{\epsilon}_{ij}^c \cdot F_c(T, \theta, \Phi),$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ – скорость деформации ползучести необлученного материала [18, 19]; $F_c(T, \theta, \Phi)$ – функция, учитывающая влияние флюкса нейтронов Φ на скорость деформации термической ползучести; θ – параметр, характеризующий уровень напряжений в рассматриваемой точке материала, связанный с девиатором действующих напряжений σ'_{ij} и начальным пределом ползучести облучаемого материала C_{Φ} соотношением:

$$\theta = \frac{\sigma'_{ij} \cdot \sigma'_{ij} - C_{\Phi}^2}{C_{\Phi}^2}.$$

Начальный предел ползучести C_{Φ} зависит от температуры и флюкса нейтронов Φ : $C_{\Phi} = C_{\Phi}(T, \Phi)$. Функция $F_c(T, \theta, \Phi)$ определяется на основе результатов экспериментов на ползучесть образцов при различных значениях параметров T , θ и Φ . Ввиду сложности и большой трудоемкости проведения таких экспериментов в дальнейшем используется упрощенная аппроксимация этой функции в виде:

$$F_c(T, \theta, \Phi) = 1 + FC(T, \theta) \cdot \Phi,$$

где $FC(T, \theta)$ – функция, учитывающая влияние облучения на скорость деформации термической ползучести, не зависящая от значения флакса Φ , которая может быть построена на основе проведения экспериментов при фиксированном значении флакса.

Зависимость начального предела ползучести облученного материала C_Φ от текущих значений температуры и флакса нейтронов также представлена в виде простейшей аппроксимации:

$$C_\Phi(T, \Phi) = C_c(T) \cdot FP(T, \Phi),$$

где $FP(T, \Phi)$ – функция, учитывающая влияние облучения на радиус начального предела ползучести, зависящая от температуры и значения флакса нейтронов Φ ; $C_c(T)$ – радиус начальной поверхности ползучести необлученного материала.

В качестве переменной, определяющей процесс накопления повреждений при ползучести облучаемого материала, принята доля энергии диссипации, изменение которой ΔV на шаге нагружения определяется соотношением [18, 19]:

$$\Delta V = \sigma'_{ij} \cdot \Delta e_{ij}^\Phi.$$

Соответствующие изменения функции поврежденности $\Delta \Psi$ и меры поврежденности $\Delta \omega$ при ползучести принимаются в виде [18, 19]:

$$\Delta \Psi = \frac{\Delta V}{V_\Phi^R}, \quad \Delta \omega = s \cdot \bar{\omega}^{(s-1)/s} \Delta \Psi,$$

где $V_\Phi^R = V_\Phi^R(T, \Pi, \Phi)$ – предельное значение энергии диссипации при ползучести, соответствующее текущему виду напряженно-деформированного состояния (НДС), характеризующему параметром Π , действующей температуре T и значению флакса нейтронов Φ ; $s = s(T)$ – функция материала; $\bar{\omega}$ – накопленное значение меры поврежденности.

Зависимость функции V_Φ^R от параметра вида НДС Π , температуры T и флакса нейтронов Φ принимается на основе соотношения:

$$V_\Phi^R = f_1(\Pi) \cdot V_0^R(T) \cdot FR(T, \Phi),$$

где V_0^R – предельное значение энергии диссипации при ползучести необлученного материала в условиях одноосного растяжения; $FR(T, \Phi)$ – функция, учитывающая влияние флакса нейтронов Φ на предельное значение энергии диссипации при ползучести; $f_1(\Pi)$ – функция вида НДС ($0 \leq f_1(\Pi) < \infty$), определяемая на основе аппроксимации полученной из экспериментов для необлученного материала зависимости V^R от вида НДС.

Ввиду возможности проявления при ползучести ряда жаропрочных сплавов в условиях облучения эффектов хрупкого разрушения в описанную модель потребовалось ввести дополнительные изменения, позволяющие учесть влияние этих эффектов на поведение сплавов. В частности, такая коррекция была введена в модель хрупкого разрушения, реализованную в вычислительном комплексе УПАКС (ВК УПАКС) для моделирования процессов разрушения необлученных материалов.

Описание эффектов хрупкого разрушения в ВК УПАКС строится на основе кинетического уравнения для изменения меры поврежденности $\Delta \omega_n$ [18], позволяющего представить развитие эффектов хрупкого разрушения как квазистационарный процесс, определяемый соотношениями

$$\Delta\omega_h = \begin{cases} C \frac{\tilde{\sigma}_1 - \sigma_0^R}{\tilde{\sigma}_1} & \text{при } \tilde{\sigma}_1 > \sigma_0^R, \\ 0 & \text{при } \tilde{\sigma}_1 \leq \sigma_0^R, \end{cases}$$

где $\tilde{\sigma}_1$ – прогнозируемые значения главных растягивающих напряжений (эффективных напряжений); $\sigma_0^R = \sigma_0^R(T)$ – разрушающие значения эффективных нормальных напряжений при одноосном растяжении; C – регуляризационный параметр, выбираемый на основе применения схемы «релаксации состояния», используемой для реализации вычислительного процесса при моделировании хрупких повреждений.

Для моделирования процессов хрупкого разрушения жаропрочного литейного сплава на никелевой основе при ползучести в условиях нейтронного облучения принимается допущение о том, что разрушающее значение эффективных нормальных напряжений $\sigma_0^R(T)$ становится функцией флюкса нейтронов Φ и текущего значения накопленной деформации ползучести k_c : $\sigma_\Phi^R = \sigma_0^R(T, \Phi, k_c)$.

В связи с ограниченным объемом необходимых экспериментальных данных для рассматриваемого сплава функция σ_Φ^R представляется в виде:

$$\sigma_\Phi^R = \sigma_0^R(T) \cdot FH(\Phi, k_c),$$

где $FH(\Phi, k_c)$ – функция, учитывающая влияние облучения на значения эффективных нормальных напряжений, зависящая от значения флюкса нейтронов Φ и текущего значения накопленной деформации ползучести k_c .

Для получения перечисленных выше материальных функций модели были использованы результаты проведенных в НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского базовых экспериментов для рассматриваемого жаропрочного сплава без облучения и имеющиеся экспериментальные данные по исследованию ползучести этого сплава при его облучении. В результате были получены функции $C_c(T)$, $l(T, \theta)$, $H^0(T, \tau)$, $h(T, \theta)$, $V_0^R(T)$, $s(T)$, необходимые для описания процессов ползучести необлученного материала [19] в диапазоне температур $T = (0,607-0,679)T_{пл}$, где $T_{пл}$ – температура плавления.

Функции $FC(T, \theta)$, $FP(T, \Phi)$, $FR(T, \Phi)$, $FH(\Phi, k_c)$, необходимые для учета влияния облучения, построены на основе результатов исследований ползучести данного сплава при его облучении потоком нейтронов при температуре $T = 0,607T_{пл}$. При этом предполагалось, что в процессе эксплуатации изделия флюкс нейтронов остается постоянным и не меняется по объему.

2. Результаты численного моделирования высокотемпературной ползучести элементов конструкций из жаропрочных сплавов

Проведена верификация предложенной модели и полученных материальных функций путем восстановления исходных кривых ползучести на основе численного моделирования в диапазоне температур $T = (0,607-0,679)T_{пл}$, показавшая хорошее согласование экспериментальных и численных результатов.

На основе указанной модели разработана и реализована в рамках ВК УПАКС [34] численная методика для решения задач высокотемпературной ползучести конструкций из жаропрочных сплавов в условиях нейтронного облучения. Решение задач исследования поведения конструкций из рассматриваемого жаропрочного сплава осуществляется в рамках используемой в ВК УПАКС общей методологии

исследования процессов деформирования и разрушения конструкций при квазистатических термосиловых нагружениях путем пошагового интегрирования инкрементальных уравнений с использованием комбинированной шаговой схемы [18].

Решение нелинейных задач на шаге осуществляется с помощью метода начальных напряжений.

Численное решение линеаризованных задач осуществляется на основе МКЭ с использованием универсальных моделей изопараметрических квадратичных конечных элементов (КЭ) с сирендиповой аппроксимацией поля перемещений [18].

Для верификации и иллюстрации возможностей разработанных методических и программных средств решен ряд задач моделирования процессов высокотемпературной ползучести и разрушения элементов конструкций, изготовленных из рассматриваемого жаропрочного сплава.

В первой задаче выполнено численное моделирование процессов ползучести фрагмента рабочей части облучаемого образца из жаропрочного литейного сплава на никелевой основе, нагретого до температуры $T = 0,607T_{пл}$, для уровня постоянных напряжений на торцах образца $\sigma = 0,35\sigma_T$ (σ_T – предел текучести материала при $T = 0,607T_{пл}$).

Решение задач осуществлялось МКЭ в осесимметричной постановке. Процесс нагружения облучаемого образца проводился в два этапа: первый этап – разогрев до $T = 0,607T_{пл}$ и приложение торцевых напряжений; второй этап – выдержка под нагрузкой в течение заданного времени при облучении потоком нейтронов.

Результаты расчетов в виде кривых зависимости деформации ползучести от времени $e^c = e^c(t)$ представлены на рис. 1. Экспериментальная кривая на рисунке изображена сплошной линией, результаты численного моделирования – штриховой.

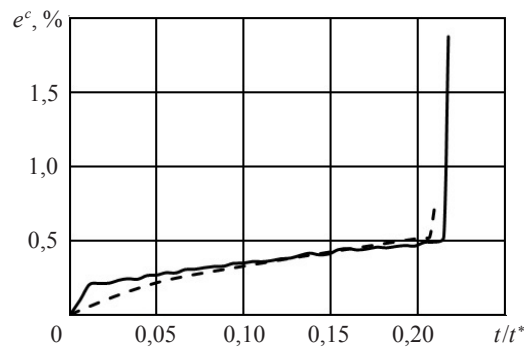


Рис. 1

Представленные результаты показывают, что для уровня напряжений $\sigma = 0,35\sigma_T$ результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами эксперимента: с приемлемой точностью описывают скорость установившейся ползучести, величину накопленной за время $t \approx 0,217t^*$ (t^* – характерное время эксплуатации) деформации ползучести и прогнозируемое время наступления хрупкого разрушения.

Во второй задаче выполнено численное моделирование процесса деформирования фрагмента сиффона из рассматриваемого жаропрочного сплава, геометрические размеры и схема конечно-элементной дискретизации которого приведены в [35], в условиях высокотемпературного силового нагружения.

В связи с наличием в геометрии фрагмента оси симметрии рассматривалась 1/16 часть фрагмента по окружности ($22,5^\circ$).

Рассмотрен следующий вариант нагружения:

- приложение внутреннего давления величиной $p = 0,003\sigma_T$ и нагрев фрагмента сильфона до температуры $T = 0,643T_{пл}$ (этап 1);
- выдержка в течение времени $t = t^*$ часов при постоянном давлении $p = 0,003\sigma_T$ и температуре $T = 0,643T_{пл}$ (этап 2).

В результате приложения нагрузки на первом этапе нагружения в сильфоне возникли напряжения, зона максимальной интенсивности которых оказалась расположенной на внешней поверхности нижнего изгиба. В указанной зоне интенсивность напряжений достигла величины $\sigma_{и} = 0,551\sigma_T$.

После выдержки в течение времени $t = t^*$ в крайних по толщине волокнах фрагмента произошла значительная релаксация напряжений вследствие ползучести и их перераспределение вглубь по толщине. Так, максимальная интенсивность напряжений снизилась до величины $\sigma_{и} = 0,215\sigma_T$.

В результате проведенных расчетов была установлена существенная нестационарность процесса деформирования сильфона. В частности, максимальная скорость ползучести в наиболее нагруженной точке наблюдалась в момент начала выдержки, причем с течением времени скорость ползучести монотонно уменьшалась.

На рис. 2 приведен график изменения во времени деформаций ползучести в наиболее нагруженной точке сильфона, показывающий резкое уменьшение скорости ползучести в процессе выдержки.

Из расчетов также следует, что зона максимальных значений деформаций ползучести (на наружной поверхности сильфона), характеризуемая длиной траектории деформаций ползучести k_c , не совпала с зоной максимальной поврежденности ω , расположенной на его внутренней поверхности.

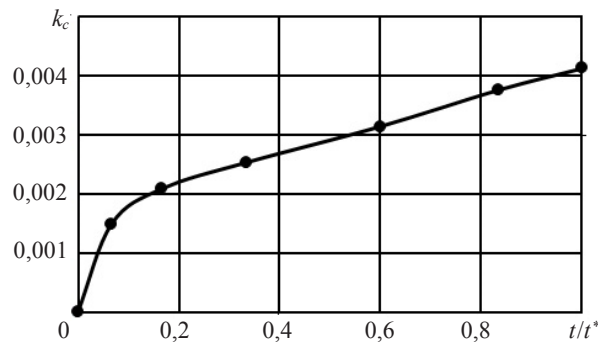


Рис. 2

Такое обстоятельство, очевидно, связано со значительным различием видов НДС в рассматриваемых зонах.

На наружной поверхности сильфона значение параметра вида НДС в зоне действия максимальных напряжений ($\Pi \approx -0,81$) существенно ниже значения этого параметра на внутренней поверхности ($\Pi \approx 0,83$). Учитывая зависимость скорости накопления повреждений от параметра Π (с увеличением значения Π скорость накопления повреждений возрастает), нетрудно объяснить наблюдаемую разницу в распределении мер поврежденности на наружной и внутренней поверхностях сильфона.

Полученная в результате расчетов картина распределения меры поврежденности ω к концу выдержки на внутренней поверхности сильфона изображена на рис. 3.

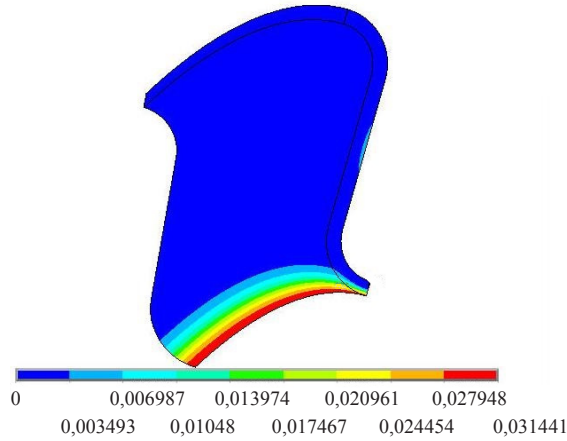


Рис. 3

В третьей задаче получены результаты численного моделирования процесса деформирования и разрушения сферической оболочки, иллюстрирующие влияние эффектов хрупкого разрушения материала при облучении вследствие развития деформаций ползучести.

Рассматривается процесс деформирования сферической оболочки, нагруженной внутренним давлением интенсивностью p , симметричным относительно оси симметрии X , при равномерном нагреве до температуры $T = 0,607T_{пл}$ и последующей выдержке при заданном флюксе нейтронов в течение некоторого времени до разрушения. Относительная толщина сферы $2(R_2 - R_1)/(R_2 + R_1) \cdot 100\% = 2\%$.

Расчет осуществлялся для симметричной 1/4 части сферы. Расчетная схема нагружения оболочки приведена на рис. 4.

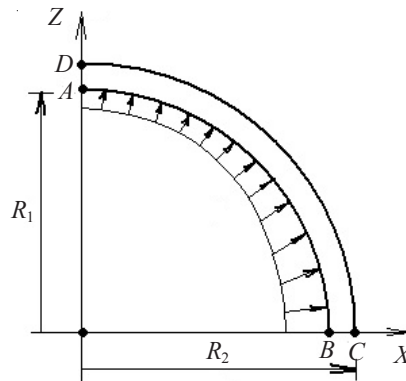


Рис. 4

Вдоль плоскости симметрии фрагмента сферы (вдоль линии AD) перемещения по X принимались равными нулю ($u = 0$), на оси симметрии (линия BC) перемещения по Z также принимались равными нулю ($w = 0$). Внутреннее давление менялось по линейному закону вдоль осевой координаты от значения $p = 0,0095\sigma_T$ (при $X = 0$) до $p = 0,0143\sigma_T$ (при $X = R_1$ в точке B).

При расчете использовались квадратичные изопараметрические конечные элементы осесимметричного тела с равномерной разбивкой фрагмента по толщине (4 КЭ) и по меридиану (20 КЭ).

Нагружение осуществлялось в 2 этапа:

- 1 – нагрев до температуры $T = 0,607T_{пл}$ и увеличение давления;
- 2 – выдержка до момента разрушения.

Второй этап разбивался на подэтапы с шагом по времени $\Delta t = 1/60$ часа.

В результате расчета установлено, что с момента начала выдержки по всему объему оболочки стали развиваться деформации ползучести, максимальная скорость которых наблюдалась в районе полюса сферы (точка B). До момента времени $t = 0,1873t^*$ процесс ползучести сопровождался соответствующим ростом поврежденности материала без проявления каких-либо эффектов хрупкого разрушения. В момент времени $t = 0,1873t^*$ в точке C сферы, где оказались наибольшими значения главных растягивающих напряжений (значения меры деформаций ползучести здесь также близки к максимальным), начался процесс хрупкого разрушения, последовательно захватывающий ближайшие точки сферы за счет перераспределения напряжений.

На рис. 5 показаны графики, характеризующие зависимости от времени мер деформаций ползучести k_c (сплошная линия) и разрушения ω (точки) в наиболее нагруженной точке сферы C .

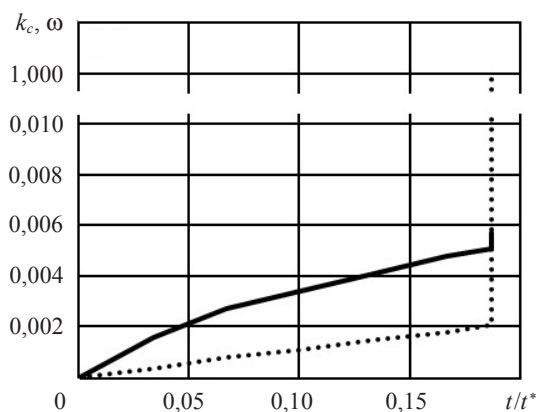


Рис. 5

Заключение

Предложена численная методика и математические модели, описывающие процессы высокотемпературной ползучести и разрушения жаропрочных сплавов в условиях термосиловых воздействий с учетом эффектов облучения.

На основе полученной экспериментальной информации определены параметры материальных функций модели термоползучести для рассматриваемого жаропрочного сплава в диапазоне температур $T = (0,607-0,679)T_{пл}$.

Проведена верификация предложенных моделей и полученных материальных функций путем восстановления исходных кривых деформирования на основе численного моделирования.

Проведено численное исследование НДС фрагмента сильфона, выполненного из жаропрочного сплава, в условиях высокотемпературного нагрева, действия внутреннего давления и последующей выдержки под нагрузкой.

Выполнено численное исследование процесса деформирования и разрушения сферической оболочки, иллюстрирующее влияние эффектов хрупкого разрушения материала в результате развития деформаций ползучести.

Список литературы

1. Работнов Ю.Н. *Ползучесть элементов конструкций*. М.: Наука, 1966. 752 с.
2. Качанов Л.М. *Основы механики разрушения*. М.: Наука, 1974. 312 с.
3. Бойцов Ю.И., Данилов В.Л., Локощенко А.М., Шестериков С.А. *Исследование ползучести металлов при растяжении*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 99 с.
4. *Закономерности ползучести и длительной прочности*. Справочник. Под ред. С.А. Шестерикова. М.: Машиностроение, 1983. 101 с.
5. Локощенко А.М. *Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов*. М.: МГИУ, 2007. 264 с.
6. Локощенко А.М. *Ползучесть и длительная прочность металлов*. М.: Физматлит, 2016. 504 с.
7. Радченко В.П., Еремин Ю.А. *Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций*. М.: Машиностроение, 2004. 264 с.
8. Арутюнян Р.А. *Проблема деформационного старения и длительного разрушения в механике материалов*. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 252 с.
9. Локощенко А.М. Длительная прочность металлов при сложном напряженном состоянии (обзор). *Изв. РАН. МТТ*. 2012. №3. С. 116–136.
10. Локощенко А.М. Результаты исследований ползучести и длительной прочности металлов в Научно-исследовательском институте механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (к юбилею Ю.Н. Работнова). *Прикладная механика и техническая физика*. 2014. Т. 55. №1. С. 144–165.
11. Arutyunyan R.A. High-temperature embrittlement and long-term strength of metallic materials. *Mechanics of Solids*. 2015. Vol. 50. Iss. 2. P. 191–197.
12. Локощенко А.М. Применение кинетической теории при анализе длительного высокотемпературного разрушения металлов в условиях сложного напряженного состояния (обзор). *Прикладная механика и техническая физика*. 2012. Т. 53. №4. С. 149–164.
13. Степанова Л.В., Игонин С.А. Описание рассеянного разрушения: параметр поврежденности Ю.Н. Работнова: историческая справка, фундаментальные результаты и современное состояние. *Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия*. 2014. №3 (114). С. 97–114.
14. Степанова Л.В., Игонин С.А. Параметр поврежденности Ю.Н. Работнова и описание длительного разрушения: результаты, современное состояние, приложение к механике трещин и перспективы. *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. Т. 56. №2. С. 133–145.
15. Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф. *Энергетический вариант теории ползучести*. Новосибирск: Институт гидродинамики АН СССР, 1986. 96 с.
16. Никитенко А.Ф. *Ползучесть и длительная прочность металлических материалов*. Новосибирск: НГАСУ, 1997. 278 с.
17. 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.
18. Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Горохов В.А. *Моделирование нелинейного деформирования и разрушения конструкций в условиях многофакторных воздействий на основе МКЭ*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. 347 с.
19. Капустин С.А., Казаков Д.А., Чурилов Ю.А., Галущенко А.И., Вахтеров А.М. Экспериментально-теоретическое изучение поведения изделий из жаропрочного сплава в условиях высокотемпературной ползучести. *Проблемы прочности и пластичности*. 2008. Вып. 70. С. 98–108.
20. Волков И.А., Игумнов Л.А., Казаков Д.А., Шишулин Д.Н., Сметанин И.В. Определяющие соотношения нестационарной ползучести при сложном напряженном состоянии. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №4. С. 436–451.

21. Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г., Казаков Д.А., Емельянов А.А., Тарасов И.С., Гусева М.А. Программная реализация процессов вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах при термомеханическом нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №2. С. 188–207.
22. Волков И.А., Игумнов Л.А., Казаков Д.А., Миронов А.А., Тарасов И.С., Шишулин Д.Н., Сметанин И.В. Модель поврежденной среды для описания длительной прочности конструкционных материалов (металлов и их сплавов). *Проблемы прочности и пластичности*. 2017. Т. 79. №3. С. 285–300.
23. Арутюнян Р.А. Проблема высокотемпературной ползучести и длительной прочности в механике материалов. *Докл. РАН*. 2017. Т. 475. №4. С. 386–388.
24. Wena J-F., Tu S-T., Gao X-L., Reddy J.N. Simulations of creep crack growth in 316 stainless steel using a novel creep-damage model. *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. Vol. 98. P. 169–184.
25. Shlyannikov V.N., Tumanov A.V., Boychenko N.V. A creep stress intensity factor approach to creep-fatigue crack growth. *Engineering Fracture Mechanics*. 2015. Vol. 142. P. 201–219.
26. Sithickbasha A.A., Mahesh S. The role of the constitutive model in creep crack growth modeling. *Engineering Fracture Mechanics*. 2015. Vol. 150. P. 47–57.
27. Nikbin K. A unified multiscale ductility exhaustion based approach to predict uniaxial, multiaxial creep rupture and crack growth. *Engineering Fracture Mechanics*. 2017. Vol. 179. P. 240–259.
28. Горохов В.А., Капустин С.А., Миронов А.А., Чурилов Ю.А. Конечно-элементное моделирование развития трещины в образце с концентратором в условиях высокотемпературной ползучести. *Проблемы прочности и пластичности*. 2017. Т. 79. №3. С. 312–326.
29. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б. Численное моделирование процессов деформирования изделий из нержавеющей сталей в условиях терморadiационных воздействий. *Проблемы прочности и пластичности*. 2005. Вып. 67. С. 26–36.
30. Капустин С.А., Горохов В.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б., Марголин Б.З., Бучатский А.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния конструкций из нержавеющей сталей, эксплуатирующихся в условиях интенсивных терморadiационных воздействий. *Проблемы прочности и пластичности*. 2007. Вып. 69. С. 106–116.
31. Margolin B.Z., Gulenko A.G., Kursevich I.P., Buchatskii A.A. Modeling for fracture in materials under long-term static creep loading and neutron irradiation. Part 1. A physico-mechanical model. *Strength of Materials*. 2006. Vol. 38. Iss. 3. P. 221–233.
32. Марголин Б.З., Гуленко А.Г., Курсевич И.П., Бучатский А.А. Моделирование разрушения материалов при длительном статическом нагружении в условиях ползучести и нейтронного облучения. Сообщение 2. Прогнозирование длительной прочности аустенитных материалов. *Проблемы прочности*. 2006. №5. С. 5–15.
33. Марголин Б.З., Гуленко А.Г., Бучатский А.А., Балакин С.М. Моделирование разрушения материалов при длительном статическом нагружении в условиях ползучести и нейтронного облучения. Сообщение 3. Прогнозирование скорости роста трещины в аустенитных материалах. *Проблемы прочности*. 2006. №6. С. 5–16.
34. *Вычислительный комплекс УПАКС*. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 147 от 31.10.2002.
35. Антипов А.А., Горохов А.Н., Горохов В.А., Казаков Д.А., Капустин С.А. Экспериментально-теоретическое изучение многоциклового разрушения элементов конструкций из сплава ВЖ-159. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2016. №1. С. 29–36.

References

1. Rabotnov Yu.N. *Polzuchest elementov konstruktsiy [The Creep of Structural Elements]*. Moscow. Nauka Publ. 1966. 752 p. (In Russian).
2. Kachanov L.M. *Osnovy mekhaniki razrusheniya [Fundamentals of Fracture Mechanics]*. Moscow. Nauka Publ. 1974. 312 p. (In Russian).
3. Boytsov Yu.I., Danilov V.L., Lokoshchenko A.M., Shesterikov S.A. *Issledovanie polzuchesti*

metallov pri rastyazhenii [The Study of Metal Creep under Tension]. Moscow. MGTU Publ. 1997. 99 p. (In Russian).

4. *Zakonomernosti polzuchesti i dlitel'noy prochnosti* [Patterns of Creep and Long-Term Strength]. Handbook. Ed: S.A. Shesterikova. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1983. 101 p. (In Russian).

5. Lokoshchenko A.M. *Modelirovanie protsessov polzuchesti i dlitel'noy prochnosti metallovo* [Simulation of the Process of Creep and Long-term Strength of Metals]. Moscow. MGIU Publ. 2007. 264 p. (In Russian).

6. Lokoshchenko A.M. *Polzuchest i dlitel'naya prochnost metallovo* [Creep and Long-term Strength of Metals]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2016. 504 p. (In Russian).

7. Radchenko V.P., Eremin Yu.A. *Reologicheskoe deformirovanie i razrushenie materialov i elementov konstruktivnykh* [Rheological Deformation and Fracture of Materials and Structural Elements]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 2004. 264 p. (In Russian).

8. Arutyunyan R.A. *Problema deformatsionnogo stareniya i dlitel'nogo razrusheniya v mekhanike materialov* [The Problem of Deformational Aging and Long-term Destruction in the Mechanics of Materials]. Saint Petersburg. SPbGU Publ. 2004. 252 p. (In Russian).

9. Lokoshchenko A.M. Long-term strength of metals in complex stress state (a survey). *Mechanics of Solids*. 2012. Vol. 47. No 3. P. 357–372.

10. Lokoshchenko A.M. Results of studying creep and long-term strength of metals at the Institute of Mechanics at the Lomonosov Moscow State University (To Yu.N. Rabotnov's Anniversary). *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2014. Vol. 55. No 1. P. 118–135.

11. Arutyunyan R.A. High-temperature embrittlement and long-term strength of metallic materials. *Mech. Solids*. 2015. Vol. 50. Iss. 2. P. 191–197.

12. Lokoshchenko A.M. Application of kinetic theory to the analysis of high-temperature creep rupture of metals under complex stress (review). *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2012. Vol. 53. No 4. P. 599–610.

13. Stepanova L.V., Igonin S.A. Opisaniye rasseyannogo razrusheniya: parametr povrezhdennosti Yu.N. Rabotnova: istoricheskaya spravka, fundamental'nye rezul'taty i sovremennoe sostoyaniye [Description of scattered destruction: damage parameter Yu.N. Rabotnova: historical background, fundamental results and current status]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya* [Bulletin of the Samara University. Natural science series]. 2014. No 3(114). P. 97–114 (In Russian).

14. Stepanova L.V., Igonin S.A. Rabotnov damageparameter and description of delayed fracture: Results, current status, application to fracture mechanics, and prospects. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2015. Vol. 56. No 2. P. 282–292.

15. Sosnin O.V., Gorev B.V., Nikitenko A.F. *Energeticheskii variant teorii polzuchesti* [Energy Version of the Theory of Creep]. Novosibirsk. Institut gidrodinamiki AN SSSR Publ. 1986. 96 p. (In Russian).

16. Nikitenko A.F. *Polzuchest i dlitel'naya prochnost metallicheskih materialov* [Creep and Durability of Metallic Materials]. Novosibirsk. NGASU Publ. 1997. 278 p. (In Russian).

17. Kazakov D.A., Kapustin S.A., Korotkikh Yu.G. *Modelirovanie protsessov deformirovaniya i razrusheniya materialov i konstruktivnykh* [Modeling of Processes of Deformation and Fracture of Materials and Structures]. Nizhny Novgorod. UNN Publ. 1999. 226 p. (In Russian).

18. Kapustin S.A., Churilov Yu.A., Gorokhov V.A. *Modelirovanie nelineynogo deformirovaniya i razrusheniya konstruktivnykh v usloviyakh mnogofaktornykh vozdeystviy na osnove MKE* [Modeling Nonlinear Deformation and Destruction of Structures in Multivariate Influences on the Basis of FEM]. Nizhny Novgorod. UNN Publ. 2015. 347 p. (In Russian).

19. Kapustin S.A., Kazakov D.A., Churilov Yu.A., Galushchenko A.I., Vakhterov A.M. Eksperimentalno-teoreticheskoe izuchenie povedeniya izdeliy iz zharoprochnogo splava v usloviyakh vysokotemperaturnoy polzuchesti [Experimental-theoretical study of the behavior of structural parts of heat-resistant alloy under high-temperature creep]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2008. Iss. 70. P. 98–108 (In Russian).

20. Volkov I.A., Igumnov L.A., Kazakov D.A., Shishulin D.N., Smetanin I.V. Opredelyayushchie sootnosheniya nestatsionarnoy polzuchesti pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Determining relations of non-stationary creep under complex stress state]. *Problemy prochnosti i plastichnosti*

- [*Problems of Strength and Plasticity*]. 2016. Vol. 78. No 4. P. 436–451 (In Russian).
21. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G., Kazakov D.A., Emel'yanov A.A., Tarasov I.S., Guseva M.A. Programmaya realizatsiya protsessov vyzkoplasticheskogo deformirovaniya i nakopleniya povrezhdeniy v konstruktsionnykh splavakh pri termomekhanicheskom nagruzhenii [Software implementation of viscoplastic deformation and damage accumulation in structural alloys during thermomechanical loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [*Problems of Strength and Plasticity*]. 2016. Vol. 78. No 2. P. 188–207 (In Russian).
 22. Volkov I.A., Igumnov L.A., Kazakov D.A., Mironov A.A., Tarasov I.S., Shishulin D.N., Smetanin I.V. Model povrezhdennoy sredy dlya opisaniya dlitelnoy prochnosti konstruktsionnykh materialov (metallov i ikh splavov) [Damaged medium model for describing the long-term strength of structural materials (metals and their alloys)]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [*Problems of Strength and Plasticity*]. 2017. Vol. 79. No 3. P. 285–300 (In Russian).
 23. Arutyunyan R.A. The problem of high-temperature creep and long-term strength in the mechanics of materials. *Doklady Physics*. 2017. Vol. 68. Iss 8. P. 384–386.
 24. Wena J-F., Tu S-T., Gao X-L., Reddy J.N. Simulations of creep crack growth in 316 stainless steel using a novel creep-damage model. *Eng. Fract. Mech.* 2013. Vol. 98. P. 169–184.
 25. Shlyannikov V.N., Tumanov A.V., Boychenko N.V. A creep stress intensity factor approach to creep-fatigue crackgrowth. *Eng. Fract. Mech.* 2015. Vol. 142. P. 201–219.
 26. Sithickbasha A.A., Mahesh S. The role of the constitutive model in creep crack growth modeling. *Eng. Fract. Mech.* 2015. Vol. 150. P. 47–57.
 27. Nikbin K. A unified multiscale ductility exhaustion based approach to predict uniaxial, multiaxial creep rupture and crack growth. *Eng. Fract. Mech.* 2017. Vol. 179. P. 240–259.
 28. Gorokhov V.A., Kapustin S.A., Mironov A.A., Churilov Yu.A. Konechno-elementnoe modelirovanie razvitiya treshchiny v obraztse s kontsentratorom v usloviyakh vysokotemperaturnoy polzuchesti [Finite element modeling of the development of cracks in a sample with a concentrator under conditions of high temperature creep]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [*Problems of Strength and Plasticity*]. 2017. Vol. 79. No 3. P. 312–326 (In Russian).
 29. Gorokhov V.A., Kapustin S.A., Churilov Yu.A., Vilenskiy O.Yu., Kaydalov V.B. Chislennoe modelirovanie protsessov deformirovaniya izdeliy iz nerzhaveyushchikh staley v usloviyakh termoradiatsionnykh vozdeystviy [Numerical modeling of the deformation process of stainless steel products under the conditions of thermo-radiation effects]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [*Problems of Strength and Plasticity*]. 2005. Iss. 67. P. 26–36 (In Russian).
 30. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Vilenskiy O.Yu., Kaydalov V.B., Margolin B.Z., Buchatskiy A.A. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktsiy iz nerzhaveyushchikh staley, ekspluatiruyushchikhsya v usloviyakh intensivnykh termoradiatsionnykh vozdeystviy [Simulation of the stress-strain state of stainless steel structures, operated under conditions of intense thermo-radiation effects]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [*Problems of Strength and Plasticity*]. 2007. Iss. 69. P. 106–116 (In Russian).
 31. Margolin B.Z., Gulenko A.G., Kursevich I.P., Buchatskii A.A. Modeling for fracture in materials under long-term static creep loading and neutron irradiation. Part 1. A physico-mechanical model. *Strength of Materials*. 2006. Vol. 38. Iss. 3. P. 221–233.
 32. Margolin B.Z., Gulenko A.G., Kursevich I.P., Buchatskii A.A. Modeling for fracture in materials under long-term static creep loading and neutron irradiation. Part 2. Prediction of creep rupture strength for austenitic materials. *Strength of Materials*. 2006. Vol. 38. Iss. 5. P. 449–457.
 33. Margolin B.Z., Gulenko A.G., Buchatskii A.A., Balakin S.M. Modeling for fracture in materials under long-term static creep loading and neutron irradiation. Part 3. Crack growth rate prediction for austenitic materials. *Strength of Materials*. 2006. Vol. 38. Iss. 6. P. 565–574.
 34. *Vychislitelnyy kompleks UPAKS*. Nauchno-tekhnicheskii tsentr po yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti. Attestatsionnyy pasport programmnoy sredstva [*Computing Complex UPAKS*. Scientific and technical centre for nuclear and radiation safety. Attestation passport software]. Registration certification software No 147 of 31.10.2002 (In Russian).
 35. Antipov A.A., Gorokhov A.N., Gorokhov V.A., Kazakov D.A., Kapustin S.A. Experimental-theoretical study of high-cycle failure of structural elements of VZh-159 alloy. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016. Vol. 45. No 1. P. 25–31.

**NUMERICAL SIMULATION OF HIGH-TEMPERATURE
CREEP OF ELEMENTS OF HEAT-RESISTANT ALLOYS STRUCTURES TAKING
INTO ACCOUNT NEUTRON IRRADIATION EFFECTS**

**Antipov A.A.¹, Gorokhov V.A.², Egunov V.V.²,
Kazakov D.A.², Kapustin S.A.², Churilov Yu.A.²**

¹*Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russian Federation*

²*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

The technique of numerical research on the basis of FEM processes of deformation and damage accumulation in the structural elements of heat-resistant alloys under conditions of high-temperature creep taking into account the influence of neutron irradiation is developed. The description of the mechanical behavior of the material is carried out within the framework of the previously developed general model of the damaged material and the creep model for non-irradiated heat-resistant alloys, supplemented by taking into account the effect of irradiation on the creep rate and the appearance of brittle fracture in a given range of temperature variation and irradiation intensity. The defining relations of the creep model of the irradiated material were obtained by modifying the creep model of the non-irradiated material: a material function was introduced, taking into account the effect of the flux of neutrons on the rate of thermal creep deformation; a material function was introduced that takes into account the effect of the neutron flux on the creep surface radius; A material function was introduced, which takes into account the effect of the neutron flux on the ultimate value of the dissipation energy at full power. To simulate the processes of brittle fracture during creep under neutron irradiation conditions, it is assumed that the destructive values of effective normal stresses are a function of temperature, flux of neutrons and the current value of accumulated creep. The material functions of the model were obtained from the results of basic experiments conducted at the Research Institute of Mechanics for the heat-resistant alloy without irradiation under consideration and the available experimental data on the study of the creep of this alloy during its irradiation. Based on the proposed model, a numerical method for solving problems of high-temperature creep of structures made of heat-resistant alloys under neutron irradiation was developed and implemented within the UPAKS computing complex. To verify and illustrate the capabilities of the developed methodological and software tools, a number of problems of modeling the processes of high-temperature creep and destruction of structural elements made of the high-temperature alloy under consideration are solved.

Keywords: creep, high-temperature loading, neutron irradiation, damage accumulation, finite element method.