

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-1-89-99

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ
МАТЕРИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ МОДЕЛИ ПОЛЗУЧЕСТИ
ПРИ ТЕРМОРАДИАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ
ДЛЯ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 1X18H10T***

© 2020 г.

Горохов В.А.

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

vas-gor@rambler.ru

Поступила в редакцию 18.12.2019

На основе имеющейся в научной литературе информации о скорости термической ползучести аустенитной стали 1X18H10T в условиях нейтронного облучения получены и верифицированы значения материальных функций модели термоползучести, реализованной в рамках аттестованного вычислительного комплекса УПАКС для моделирования деформирования конструкций при термосиловых и терморadiационных воздействиях. Перечень идентифицируемых материальных функций модели термоползучести включает в себя: функцию, характеризующую начальную скорость деформации ползучести, отнесенную к единичному уровню напряжений при заданном уровне температуры и параметре напряжений; радиус поверхности ползучести, являющийся функцией температуры; функцию упрочнения, характеризующую изменение начальной скорости ползучести от параметра упрочнения при заданной температуре; функцию, учитывающую влияние флакса быстрых нейтронов на скорость ползучести при заданной температуре. С использованием аналитической аппроксимации экспериментальных данных, описывающей скорость термической ползучести сталей в условиях нейтронного облучения в зависимости от напряжений, температуры и флакса быстрых нейтронов, получены соотношения для определения значений всех функций модели термоползучести. Значение радиуса поверхности ползучести для фиксированного значения температуры определялось из условия, что деформация ползучести за выбранный промежуток времени и накопленный за это время флюенс нейтронов не превысит величины 0,2%. С помощью полученных материальных функций и модели ползучести, реализованной в программных средствах вычислительного комплекса УПАКС, выполнено численное моделирование деформирования стали 1X18H10T в условиях длительного термосилового нагружения и нейтронного облучения. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с аналитическими зависимостями, описывающими ползучесть дан-

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

ного материала в условиях одноосного напряженно-деформированного состояния. Проведено численное моделирование ползучести в предположении отсутствия нейтронного облучения. Как и в случае нейтронного облучения, получено хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: ползучесть, аустенитная нержавеющая сталь, нейтронное облучение, материальная функция, идентификация, верификация.

Введение

Согласно многочисленным экспериментальным данным, деформационные и прочностные свойства конструкционных материалов существенно зависят от уровня и интенсивности нейтронного облучения [1–8]. В цикле работ [9–12] созданы и программно реализованы математические модели упруговязкопластического деформирования нержавеющих сталей [9–11] и искусственного конструкционного графита [10, 12, 13] при квазистатических терморadiационных и термомеханических нагрузениях. Созданные модели [10] описывают основные закономерности поведения нержавеющих сталей и графитовых материалов в условиях термомеханических и радиационных воздействий с учетом зависимости их механических и теплофизических характеристик от уровней действующих температур и нейтронного облучения, эффектов радиационного формоизменения и терморadiационной ползучести. Развитые модели и разработанные на их основе программные средства позволили решить ряд актуальных задач исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкций ядерных энергетических установок из нержавеющих сталей и конструкционных графитов, эксплуатируемых в условиях термомеханических и радиационных воздействий [10].

Статья [14] посвящена конечно-элементному расчету кинетики НДС графитового блока кладки газоохлаждаемого реактора и численному исследованию влияния вариантов определяющих соотношений радиационной ползучести (линейных и нелинейных) на напряженное и деформированное состояние рассматриваемого элемента конструкции. Показано, что при относительно небольших дозах облучения результаты расчетов по линейной и нелинейной моделям радиационной ползучести практически совпадают, однако при увеличении дозы облучения линейная модель не способна описать адекватно закономерности деформирования материала и для получения более достоверных данных о закономерностях деформирования графитовой кладки необходимо использовать нелинейную модель радиационной ползучести.

Авторами статьи [15] предложена физико-механическая модель, которая описывает разрушение материалов, подвергающихся нейтронному облучению в условиях ползучести. Модель основана на представлении материала как совокупности элементарных ячеек, включающих в себя границу зерна. Определяющие уравнения модели описывают вязкопластическое деформирование материала с учетом развития зернограницных пор. В качестве критерия разрушения принимается условие потери пластической устойчивости элементарной ячейки, представляющей собой конгломерат матрицы материала и пор [15].

Физико-механическая модель разрушения [15] в статье [16] применена для прогнозирования длительной прочности и пластичности стали 1X18N10T в исходном и облучаемом состояниях. Показано, что нейтронное облучение приводит к уменьшению длительной прочности и пластичности материала. Отмечено хорошее соот-

ветствие расчетных и экспериментальных данных о снижении долговечности облучаемого материала по сравнению с материалом в исходном состоянии.

Инженерный подход прогнозирования скорости роста трещины в условиях нейтронного облучения и ползучести на основе модели разрушения [15] предложен в статье [17]. Сформулированное уравнение для распространения трещины базируется на соотношении по прогнозированию скорости роста трещины в необлученном материале, дополненном параметрами, учитывающими увеличение скорости развития трещины от флакса и флюенса нейтронов.

В статье [18] предложен метод прогнозирования сопротивления усталостному разрушению, учитывающий влияние нейтронного облучения на скорость деформирования в цикле нагружения. Метод основан на уравнении Коффина – Мэнсона и развивает подходы, заложенные в нормативном документе [19]. С помощью предложенного метода получены расчетные данные, которые сопоставлены с экспериментальными данными и показывают их хорошее соответствие [18].

Развитая в [20] модель позволяет определять статическую трещиностойкость аустенитных материалов как функцию температуры и дозы нейтронного облучения отдельно для основного материала и материала сварочного шва в широком диапазоне температур. Входными данными для предлагаемой модели являются предел текучести и предел прочности материала в зависимости от температуры и дозы облучения.

В настоящей статье на основе имеющейся в [15, 16] информации о скорости термической ползучести при терморadiационных воздействиях аустенитной стали 1X18H10T получены значения материальных функций модели [10], с применением которых с помощью модели ползучести, реализованной в программных средствах вычислительного комплекса (ВК) УПАКС [21], выполнено численное моделирование деформирования стали указанной марки в условиях длительного термомеханического нагружения и нейтронного облучения.

1. Получение материальных функций модели ползучести при терморadiационных воздействиях для стали 1X18H10T

В [9, 10] разработана и апробирована на тестовых и прикладных задачах модель термоползучести нержавеющей сталей в условиях нейтронного облучения.

Для описания скорости деформации термической ползучести $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ используется модель упрочнения, применяемая для описания ползучести материалов при термомеханических нагружениях [10], дополненная учетом влияния на процесс ползучести флакса быстрых нейтронов $\Phi = dF/dt$ (F – флюенс быстрых нейтронов):

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = L_0(T, \theta)H(T, k_c)(1 + F_c(T) \cdot \Phi). \quad (1)$$

Здесь $L_0(T, \theta)$ – функция, характеризующая начальную скорость деформации термической ползучести материала, отнесенную к единичному напряжению, при уровне напряжений, определяемых параметром θ :

$$\theta = \frac{\sqrt{1,5\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}} - C_0}{C_0}, \quad (2)$$

$C_0 = C_0(T)$ – радиус начальной поверхности ползучести; $H(T, k_c)$ – функция упрочнения, характеризующая изменение начальной скорости деформации ползучести от параметра упрочнения k_c ; $F_c(T)$ – функция, учитывающая влияние флакса Φ на

скорость деформации термической ползучести $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ при заданном уровне температуры T .

В [22, 23] получены и верифицированы материальные функции модели термоползучести для нержавеющей сталей X18H9 и X16H11M3.

Аустенитная нержавеющая сталь 1X18H10T так же, как и стали X18H9 и X16H11M3, применяется при изготовлении ответственных конструктивных элементов ядерных энергетических установок, эксплуатирующихся в условиях интенсивных терморadiационных воздействий [16]. В [15] приведено уравнение, описывающее скорость ползучести нержавеющей сталей в условиях нейтронного облучения:

$$\dot{\epsilon}^c = a_c (\sigma_{eq})^{n_c} (k_c)^{m_c} \left[1 + \frac{\Phi}{\Phi_\xi} \exp \frac{Q_\Phi}{R_g T_a} \right], \quad (3)$$

где $\dot{\epsilon}^c$ – скорость ползучести; σ_{eq} – интенсивность напряжений; k_c – длина траектории ползучести; $R_g = 8,314$ Дж/(К·моль) – универсальная газовая постоянная; T_a – абсолютная температура; Φ – флюкс нейтронов; $a_c, n_c, m_c, \Phi_\xi, Q_\Phi$ – параметры материала. В таблице 1 для стали 1X18H10T приведены значения температурно-зависимых параметров a_c, n_c, m_c [16]:

Таблица 1

T_a, K	$a_c, (\text{МПа})^{-n_c}/\text{час}$	n_c	m_c
823	$1,43 \cdot 10^{-40}$	12,90	-3,040
873	$8,63 \cdot 10^{-26}$	8,37	-1,030
923	$2,38 \cdot 10^{-20}$	6,90	-0,309
973	$1,93 \cdot 10^{-17}$	6,22	-0,047

В [16] также приведены оценки значения параметров Φ_ξ и Q_Φ по результатам обработки экспериментальных данных: $\Phi_\xi = 8,6 \cdot 10^{14}$ н/(см²·с), $Q_\Phi = 3,55 \cdot 10^4$ Дж/моль.

Значение радиуса поверхности ползучести $C_0(T)$ для фиксированного значения температуры T выбиралось из условия, что деформация ползучести за 40 лет при накопленном за это время флюенсе нейтронов $F = 10^{23}$ н/см² не превысит величины 0,2%. Получить такую оценку можно, проинтегрировав соотношение (1) по времени. В результате интегрирования получим соотношение для деформации ползучести e^c :

$$e^c = \left[(1 - m_c) a_c (\sigma_{eq})^{n_c} \left(1 + \frac{\Phi}{\Phi_\xi} \exp \frac{Q_\Phi}{R_g T_a} \right) t \right]^{1/(1-m_c)}. \quad (4)$$

Полученные на основе соотношения (4) и с учетом упомянутых выше ограничений для стали 1X18H10T значения радиуса поверхности ползучести $C_0(T)$ для температур $T = 550, 600, 650$ и 700 °C приведены в таблице 2.

Таблица 2

$T, \text{°C}$	550	600	650	700
$C_0(T), \text{МПа}$	50	35	27	18

В связи с тем, что в момент начала ползучести (время ползучести $t = 0, k_c = 0$) начальная скорость ползучести $\dot{\epsilon}_0^c$, согласно соотношению (3), обратилась бы в бесконечность, при вычислении материальных функций модели $L_0(T, \theta)$ и $H(T, k_c)$ принималось, что в диапазоне значений длины траектории ползучести $0 \leq k_c \leq k_c^0$ скорость ползучести постоянна и вычисляется по формуле

$$\dot{\epsilon}_0^c = a_c (\sigma_{eq})^{n_c} (k_c^0)^{m_c} \left[1 + \frac{\Phi}{\Phi_\xi} \exp \frac{Q_\Phi}{R_g T_a} \right]. \quad (5)$$

Значение k_c^0 было принято равным: 0,01 для температуры $T = 550$ °C; 0,005 для температуры $T = 600$ °C; 0,001 для температур $T = 650$ °C и $T = 700$ °C.

С учетом сделанных допущений о скорости ползучести на начальной стадии были получены значения функции $L_0(T, \theta)$, характеризующей начальную скорость деформации термической ползучести материала. Полученные на основе соотношений (2) и (5) значения функции $L_0(T, \theta)$ для стали 1X18H10T приведены в таблице 3.

Таблица 3

$\theta \backslash T, ^\circ\text{C}$	550	600	650	700
0	$2,83844 \cdot 10^{-14}$	$4,85124 \cdot 10^{-12}$	$5,60561 \cdot 10^{-11}$	$9,52971 \cdot 10^{-11}$
0,5	$3,53643 \cdot 10^{-12}$	$9,63043 \cdot 10^{-11}$	$6,13143 \cdot 10^{-10}$	$7,91182 \cdot 10^{-10}$
1,0	$1,08477 \cdot 10^{-10}$	$8,02499 \cdot 10^{-10}$	$3,34734 \cdot 10^{-9}$	$3,55186 \cdot 10^{-9}$
1,5	$1,54371 \cdot 10^{-9}$	$4,15596 \cdot 10^{-9}$	$1,24873 \cdot 10^{-8}$	$1,13848 \cdot 10^{-8}$
2,0	$1,35152 \cdot 10^{-8}$	$1,59308 \cdot 10^{-8}$	$3,66133 \cdot 10^{-8}$	$2,94885 \cdot 10^{-8}$
2,5	$8,46231 \cdot 10^{-8}$	$4,96175 \cdot 10^{-8}$	$9,09127 \cdot 10^{-8}$	$6,59348 \cdot 10^{-8}$
3,0	$4,14565 \cdot 10^{-7}$	$1,32750 \cdot 10^{-7}$	$1,99884 \cdot 10^{-7}$	$1,32383 \cdot 10^{-7}$

Значения функции упрочнения $H(T, k_c)$ для фиксированного значения температуры T можно получить из соотношений (3) и (5):

$$H(T, k_c) = \frac{\dot{\epsilon}^c}{\dot{\epsilon}_0^c} = \left(\frac{k_c}{k_c^0} \right)^{m_c}. \quad (6)$$

Полученные значения функции упрочнения $H(T, k_c)$ для стали 1X18H10T приведены в таблице 4.

Таблица 4

$k_c \backslash T, ^\circ\text{C}$	550	600	650	700
0	1	1	1	1
0,001	–	–	1	1
0,005	–	1	0,60816	0,92715
0,010	1	0,48971	0,49091	0,89743
0,015	0,29153	0,32253	–	–
0,020	0,12158	0,23982	0,39626	0,86866
0,030	0,03544	0,15794	0,34960	0,85227
0,040	0,01478	–	–	–
0,050	0,00750	0,09333	0,29855	0,83205
0,070	0,00270	0,06599	0,26907	0,81899

Значение функции $F_c(T)$, учитывающей влияние флакса Φ на скорость деформации термической ползучести $\dot{\epsilon}_{ij}^c$, при заданном уровне температуры T можно получить из соотношений (1) и (3):

$$F_c(T) = \frac{\exp(Q_\Phi / (R_g T_a))}{\Phi_\xi}. \quad (7)$$

Полученные значения функции упрочнения $F_c(T)$ для стали 1X18H10T приведены в таблице 5.

Таблица 5

$T, ^\circ\text{C}$	550	600	650	700
$F_c(T)$	$2,08 \cdot 10^{-13}$	$1,55 \cdot 10^{-13}$	$1,19 \cdot 10^{-13}$	$9,36 \cdot 10^{-14}$

Таким образом, на основе соотношения (3), полученного по результатам обработки экспериментальных данных о скорости ползучести аустенитной стали 1X18H10T [16], определены значения всех материальных функций модели термоползучести (1), (2) в условиях облучения.

2. Верификация материальных функций модели ползучести при терморadiационных воздействиях для стали 1X18H10T

Для верификации полученных материальных функций модели ползучести осуществляется исследование кинетики напряженно-деформированного состояния призматического стержня, находящегося под действием равномерно распределенных по объему температурных и нейтронных полей. На один из торцов стержня налагаются кинематические граничные условия, исключающие перемещения стержня в осевом направлении, а другой торец находится под действием равномерно распределенных растягивающих нагрузок интенсивностью q .

Процесс нагружения стержня моделировался двумя этапами нагружения. На первом этапе осуществлялось растяжение поверхностной нагрузкой интенсивностью q нагретого до температуры T стержня. На втором этапе осуществлялось облучение стержня потоками нейтронов до значения флюенса $F = 2,425 \cdot 10^{22}$ н/см² за время $t = 100$ тыс. часов. Было рассмотрено 4 варианта нагружения:

- 1) $T = 550$ °С, $q = 150$ МПа;
- 2) $T = 600$ °С, $q = 87,5$ МПа;
- 3) $T = 650$ °С, $q = 54$ МПа;
- 4) $T = 700$ °С, $q = 36$ МПа.

Для каждого из рассмотренных вариантов нагрузок также была решена задача о ползучести стержня без облучения, то есть принималось, что $F = 0$.

Результаты численного моделирования с помощью разработанных в [9, 10] методики и программных средств ВК УПАКС [21] в виде зависимости деформации ползучести в стержне от времени выдержки приведены на рис. 1 (вариант нагружения 1), рис. 2 (вариант нагружения 2), рис. 3 (вариант нагружения 3) и рис. 4 (вариант нагружения 4). На представленных рисунках: точки – результаты численного моделирования по методике [9, 10] с использованием полученных в настоящей статье материальных функций модели ползучести при $F = F^* = 2,425 \cdot 10^{22}$ н/см²; сплошные линии – результаты аналитического решения (4) при $F = F^*$; треугольники – результаты численного моделирования по методике [9, 10] с использованием полученных в настоящей статье материальных функций модели ползучести при $F = 0$; пунктирные линии – результаты аналитического решения (4) при $F = 0$.

Приведенные рисунки демонстрируют, что результаты численного моделирования практически совпадают с аналитическими зависимостями, описывающими ползучесть данного материала в условиях одноосного НДС. Также можно отметить хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных в предположении отсутствия нейтронного облучения.

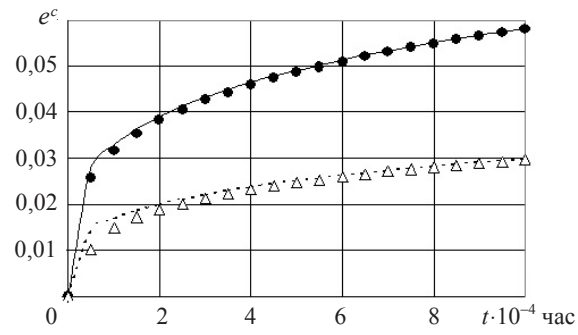


Рис. 1

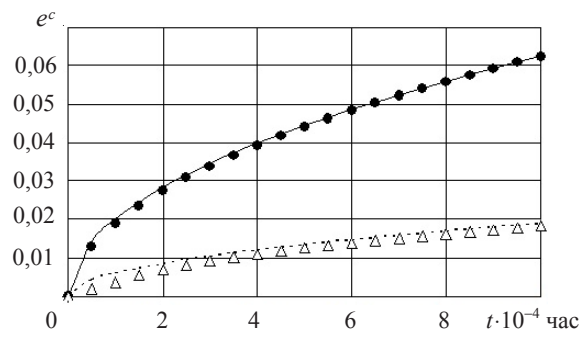


Рис. 2

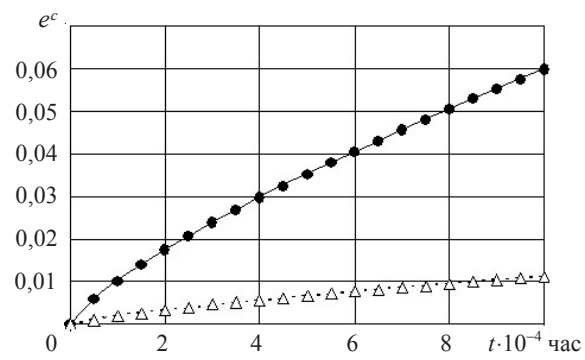


Рис. 3

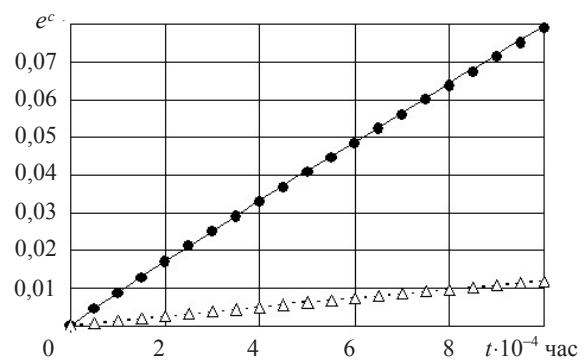


Рис. 4

Заключение

На основе аналитической аппроксимации, описывающей скорость термической ползучести сталей в условиях нейтронного облучения, получены соотношения для определения значений материальных функций модели термической ползучести, реализованной в рамках программного средства ВК УПАКС. Для аустенитной стали 1X18H10T получены значения материальных функций модели ползучести для температур $T = 550, 600, 650$ и 700 °С. С помощью программных средств ВК УПАКС выполнено численное моделирование ползучести стали 1X18H10T в условиях длительного термомеханического нагружения и нейтронного облучения. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с аналитическими зависимостями, описывающими ползучесть данного материала в условиях одноосного НДС. Продемонстрировано хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных ползучести при отсутствии нейтронного облучения.

Список литературы

1. Писаренко Г.С., Киселевский В.Н. *Прочность и пластичность материалов в радиационных потоках*. Киев: Наукова думка, 1979. 284 с.
2. Porollo S.I., Konobeev Yu.V., Garner F.A. Swelling and microstructure of austenitic stainless steel ChS-68 CW after high dose neutron irradiation. *Journal of Nuclear Materials*. 2009. Vol. 393. No 1. P. 61–66.
3. Chengliang Li, Guogang Shu, Wei Liu, Yuangang Duan. Effects of neutron irradiation on elastic modulus of RPV steel. *Annals of Nuclear Energy*. 2019. Vol. 134. P. 20–26.
4. Adamson R.B., Coleman C.E., Griffiths M. Irradiation creep and growth of zirconium alloys: A critical review. *Journal of Nuclear Materials*. 2019. Vol. 521. P. 167–244.
5. Hall Jr. M.M., Flinn J.E. Stress state dependence of in-reactor creep and swelling. Part 2: Experimental results. *Journal of Nuclear Materials*. 2010. Vol. 396. P. 119–129.
6. Xiang-wen Zhou, Ya-ping Tang, Zhen-ming Lu, Jie Zhang, Bing Liu. Nuclear graphite for high temperature gas-cooled reactors. *New Carbon Materials*. 2017. Vol. 32. No 3. P. 193–204.
7. Chopra O.K., Ra A.S. A review of irradiation effects on LWR core internal materials – IASCC susceptibility and crack growth rates of austenitic stainless steels. *Journal of Nuclear Materials*. 2011. Vol. 409. No 3. P. 235–256.
8. Margolin B.Z., Murashova A.I., Neustroev V.S. Analysis of the influence of type of stress state on radiation swelling and radiation creep of austenitic steels. *Strength of Materials*. 2012. Vol. 44. No 3. P. 227–240.
9. 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.
10. Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Горохов В.А. *Моделирование нелинейного деформирования и разрушения конструкций в условиях многофакторных воздействий на основе МКЭ*. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2015. 347 с.
11. 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.
12. Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б., Рябцов А.В. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния изделий из графита при терморadiационных нагружениях. *Проблемы прочности и пластичности*. 2004. Вып. 66. С. 51–61.
13. Капустин С.А., Горохов В.А., Чурилов Ю.А., Слепнев Ю.Г. Численное моделирование поведения конструкций из трансверсально-изотропных материалов в условиях квази-

статических силовых и терморadiационных воздействий. *Проблемы прочности и пластичности*. 2006. Вып. 68. С. 53–60.

14. Mohanty S., Majumdar S. Finite element based stress analysis of graphite component in high temperature gas cooled reactor core using linear and nonlinear irradiation creep models. *Nuclear Engineering and Design*. 2015. Vol. 292. P. 32–38.

15. 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. No 3. P. 221–233.

16. 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. No 5. P. 449–457.

17. 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. No 6. P. 565–574.

18. Margolin B.Z., Gulenko A.G., Fedorova V.A., Filatov V.M. A method for predicting fracture resistance of material in cyclic loading under viscoelastoplastic deformation and neutron irradiation conditions. *Strength of Materials*. 2008. Vol. 40. No 6. P. 601–614.

19. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок* (ПНАЭ Г-7-002-86). М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.

20. Минкин А.И., Марголин Б.З., Смирнов В.И., Сорокин А.А. Развитие модели для прогнозирования статической трещиностойкости аустенитных материалов в условиях нейтронного облучения. *Вопросы материаловедения*. 2013. №3 (75). С. 107–119.

21. *Программа УМВ ВК УПАКС*. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 268 от 18.02.2010 по учету НТЦ ЯРБ Ростехнадзора.

22. Капустин С.А., Горохов В.А., Чурилов Ю.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б., Зверев Д.Л., Гуленко А.Г., Сорокин А.А. Верификация методических и программных средств численного исследования напряженно-деформированного состояния конструкций из стали типа Х16Н1М3 при квазистатических терморadiационных нагружениях. *Проблемы прочности и пластичности*. 2010. Вып. 72. С. 36–45.

23. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Vasilev B.A., Vilenskii O.Y., Kaidalov V.B., Osetrov D.L., Margolin B.Z., Gulenko A.G. A comparative analysis of radiation-thermal forming for reflectors of reactors BN-600 and BN-800 by results of numerical simulation. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2011. Vol. 40. No 6. P. 585–591.

References

1. Pisarenko G.S., Kiselevskiy V.N. *Prochnost i plastichnost materialov radiatsionnykh potokakh* [The Strength and Plasticity of Materials in Radiation Fluxes]. Kiev. Naukova dumka Publ. 1979. 284 p. (In Russian).

2. Porollo S.I., Konobeev Yu.V., Garner F.A. Swelling and microstructure of austenitic stainless steel ChS-68 CW after high dose neutron irradiation. *J. Nucl. Mater.* 2009. Vol. 393. No 1. P. 61–66.

3. Chengliang Li, Guogang Shu, Wei Liu, Yuangang Duan. Effects of neutron irradiation on elastic modulus of RPV steel. *Ann. Nucl. Energy*. 2019. Vol. 134. P. 20–26.

4. Adamson R.B., Coleman C.E., Griffiths M. Irradiation creep and growth of zirconium alloys: A critical review. *J. Nucl. Mater.* 2019. Vol. 521. P. 167–244.

5. Hall Jr. M.M., Flinn J.E. Stress state dependence of in-reactor creep and swelling. Part 2: Experimental results. *J. Nucl. Mater.* 2010. Vol. 396. P. 119–129.

6. Xiang-wen Zhou, Ya-ping Tang, Zhen-ming Lu, Jie Zhang, Bing Liu. Nuclear graphite for high temperature gas-cooled reactors. *New Carbon Materials*. 2017. Vol. 32. No 3. P. 193–204.

7. Chopra O.K., Ra A.S. A review of irradiation effects on LWR core internal materials – IASCC susceptibility and crack growth rates of austenitic stainless steels. *J. Nucl. Mater.* 2011. Vol. 409. No 3. P. 235–256.

8. Margolin B.Z., Murashova A.I., Neustroev V.S. Analysis of the influence of type of stress state on radiation swelling and radiation creep of austenitic steels. *Strength Mater.* 2012. Vol. 44. No 3. P. 227–240.

9. 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 simulation of deformation processes of stainless steel workpieces under thermoradiation effects]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2005. Iss. 67. C. 26–36 (In Russian).
10. Kapustin S.A., Churilov Yu.A., Gorokhov V.A. *Modelirovanie nelineynogo deformirovaniya i razrusheniya konstruksiy 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).
11. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Vilenskiy O.Yu., Kaydalov V.B., Margolin B.Z., Buchatskiy A.A. Modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruksiy iz nerzhaveyushchikh staley, ekspluatiruyushchikhsya v usloviyakh intensivnykh termoradiatsionnykh vozdeystviy [Studying the stressed-strained state of stainless steel structures working under intensive thermal-radiation loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2007. Iss. 69. P. 106–116 (In Russian).
12. Gorokhov V.A., Kapustin S.A., Churilov Yu.A., Vilenskiy O.Yu., Kaydalov V.B., Ryabtsov A.V. Chislennoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya izdeliy iz grafitu pri termoradiatsionnykh nagruzheniyakh [Numerical simulation of stressed-strained state of graphite workpieces under thermoradiation loadings]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2004. Iss. 66. P. 51–61 (In Russian).
13. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Churilov Yu.A., Slepnev Yu.G. Chislennoe modelirovanie povedeniya konstruksiy iz transversal'no-izotropnykh materialov v usloviyakh kvazistaticheskikh silovykh i termoradiatsionnykh vozdeystviy [Numerically modeling the behaviour of structures made of transversally isotropic materials under quasi-static stress loading and a thermal-radiational effect]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2006. Iss. 68. P. 53–60 (In Russian).
14. Mohanty S., Majumdar S. Finite element based stress analysis of graphite component in hightemperature gas cooled reactor core using linear and nonlinear irradiation creep models. *Nuclear Engineering and Design*. 2015. Vol. 292. P. 32–38.
15. 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 Mater.* 2006. Vol. 38. No 3. P. 221–233.
16. 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 Mater.* 2006. Vol. 38. No 5. P. 449–457.
17. 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 Mater.* 2006. Vol. 38. No 6. P. 565–574.
18. Margolin B.Z., Gulenko A.G., Fedorova V.A., Filatov V.M. A method for predicting fracture resistance of material in cyclic loading under viscoelastoplastic deformation and neutron irradiation conditions. *Strength Mater.* 2008. Vol. 40. No 6. P. 601–614.
19. *Normy rascheta na prochnost oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok (PNAE G-7-002-86) [Norms of Calculation for Strength of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants (PNAE G-7-002-86)]*. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1989. 525 p. (In Russian).
20. Minkin A.I., Margolin B.Z., Smirnov V.I., Sorokin A.A. Razvitie modeli dlya prognozirovaniya staticheskoy treshchinostoykosti austenitnykh materialov v usloviyakh neytronnogo oblucheniya [Development of a model for predicting static crack resistance of austenitic materials under neutron irradiation]. *Voprosy materialovedeniya [Materials Science Issues]*. 2013. No 3 (75). P. 107–119 (In Russian).
21. *Programma UMB VK UPAKS*. Registratsionnyy pasport attestatsii PS №268 ot 18.02.2010 po uchetu NTTs YaRB Rostekhnadzora [UPAKS Software. Registration passport of certification of PS No 268 from 02.18.2010 for accounting SEC NRS of Rostekhnadzor] (In Russian).
22. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Churilov Yu.A., Vilenskiy O.Yu., Kaydalov V.B., Zverev D.L., Gulenko A.G., Sorokin A.A. Verifikatsiya metodicheskikh i programmnykh sredstv chislennoogo issle-

dovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktsiy iz stali tipa Kh16N11M3 pri kvazistaticheskikh termoradiatsionnykh nagruzheniyakh [Verification of the methods and software for numerically studying the stressed-strained state of structures made of the X16H11M3 steel under quasistatic thermal radiation loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2010. Iss. 72. P. 36–45 (In Russian).

23. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Vasilev B.A., Vilenskii O.Y., Kaidalov V.B., Osetrov D.L., Margolin B.Z., Gulenko A.G. A comparative analysis of radiation-thermal forming for reflectors of reactors BN-600 and BN-800 by results of numerical simulation. *J. Mach. Manufact. Reliab.* 2011. Vol. 40. No 6. P. 585–591.

IDENTIFICATION AND VERIFICATION OF MATERIAL FUNCTIONS OF THE CREEP MODEL UNDER THERMAL RADIATION EFFECTS FOR AUSTENITIC STEEL 1X18H10T

Gorokhov V.A.

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

In the present paper, on the basis of the information available in the scientific literature on the thermal creep rate of 1X18H10T austenitic steel under neutron irradiation conditions, the material functions of the thermal creep model implemented and verified in the framework of the certified software for numerical modeling of structural deformation under thermal and thermal radiation effects of UPAKS software are obtained and verified. The list of identifiable material functions of the thermal creep model includes: a function that characterizes the initial creep strain rate, referred to a unit stress level at a given temperature level and stress parameter; the radius of the creep surface, which is a function of temperature; the hardening function, characterizing the change in the initial creep rate from the hardening parameter at a given temperature; a function that takes into account the effect of a fast neutron flux on the creep rate at a given temperature. Using an analytical approximation of experimental data describing the rate of thermal creep of steels under neutron irradiation depending on the stresses, temperature, and flux of fast neutrons, we obtained relations for determining the values of all the functions of the thermal creep model. The value of the radius of the creep surface for a fixed temperature was determined from the condition that the creep deformation for a selected period of time and the neutron flux accumulated during this time will not exceed 0.2%. Using the UPAKS software, the creep model and the obtained material functions implemented in them, numerical simulation of the deformation of 1X18H10T steel under conditions of prolonged thermal load and neutron irradiation was performed. The results of numerical modeling are in good agreement with the analytical dependences that describe the creep of a given material under uniaxial SSS. A numerical creep simulation was also carried out under the assumption of the absence of neutron irradiation. As in the case of neutron irradiation, good agreement is obtained between the calculated and experimental data.

Keywords: creep, austenitic stainless steel, neutron irradiation, material function, identification, verification.