

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2018-80-4-543-554

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ-14*

© 2018 г. **Рябов А.А.¹, Романов В.И.¹, Вяткин Ю.А.^{1,2},
Пухов М.А.^{1,2}, Капустин С.А.³, Горохов В.А.³**

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

²*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Саровский физико-технический институт,
Саров, Российская Федерация*

³*Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

m.a.puhov@gmail.com

Поступила в редакцию 20.08.2018

В настоящее время в РФЯЦ – ВНИИЭФ разрабатывается высокопроизводительный многофункциональный программный комплекс ЛОГОС решения задач прочности и тепломассопереноса для развития суперкомпьютерных технологий наукоемких отраслей промышленности России. Одним из перспективных направлений развития программного комплекса ЛОГОС является разработка модуля ползучести. Представлены результаты экспериментальных и численных исследований ползучести титанового сплава ВТ-14. Разработка и программная реализация алгоритмов математической модели термоползучести выполнена на основе работ С.А. Капустина. Эталонные результаты экспериментальных исследований ползучести на цилиндрических образцах из титанового сплава ВТ-14 получены в лаборатории СарФТИ НИЯУ МИФИ. Использовались стандартные образцы цилиндрической формы, закрепленные по зажимной части с одной стороны и нагруженные постоянным усилием. Управление испытанием и обработка результатов экспериментов производилась с использованием программного комплекса Autograph TrapeziumX. Численные исследования выполнены на основе программных средств ЛОГОС и УПАКС. Приведено описание методов получения параметров материальных функций на базе экспериментальных данных. Выполнен сравнительный анализ численных и экспериментальных результатов ползучести цилиндрического образца, подверженного длительному действию постоянной нагрузки. Исследования ползучести титанового сплава ВТ-14 проводились на универсальной прецизионной испытательной машине Shimadzu AG-X, имеющей два измерительных канала для усилия и перемещения. По результатам эксперимен-

*Выполнено при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» в рамках соглашения №14.578.21.0246 (уникальный идентификатор RFMEFI57817X0246).

тального исследования определены материальные функции модели ползучести.

Ключевые слова: эксперимент, расчет, ползучесть, диаграмма, конечно-элементная модель, граничные условия, деформации ползучести, скорость деформаций, материальные функции.

Введение

Условия эксплуатации современных конструкций характеризуются высоким уровнем действующих нагрузок при постоянном ужесточении требований по снижению металлоемкости изделий наряду с повышением их надежности и безопасности. Эти требования диктуют необходимость проведения высокоточных прочностных расчетов в условиях, близких к реальной эксплуатации, и прогнозирования возможных разрушений.

Особую роль в оценке прочности конструкций играют необратимые деформации, обусловленные кратковременными или длительными нагрузками, вызывающими напряжения, превышающие предел текучести, либо относительно невысокие термосиловые воздействия, приводящие к деформациям ползучести, либо релаксация напряжений, меняющихся во времени даже при постоянной нагрузке [1].

Практически все существующие конструкционные материалы, включая металлы, при различных температурах и уровнях напряжений в той или иной мере обладают свойствами ползучести. Так, даже при комнатной температуре обычные конструкционные стали за пределом пропорциональности обнаруживают свойства так называемой ограниченной ползучести, при которой деформации с увеличением времени асимптотически стремятся к конечному пределу [2]. Некоторые металлы, как, например, свинец, склонны к образованию «холодной ползучести», при которой деформации ползучести проявляются уже при нормальной температуре даже при напряжениях ниже предела пропорциональности.

Нередко на практике деформациями ползучести пренебрегают в силу их малости по сравнению с упругими или пластическими деформациями. Но свойства ползучести материалов необходимо учитывать, когда пренебрежение ими может привести к существенным ошибкам в оценке деформированного состояния и работоспособности исследуемых объектов.

Проведение экспериментальных исследований ползучести на реальных конструкциях является весьма затратным, а зачастую и невозможным. Поэтому актуальной является проблема расчетного исследования ползучести и прогнозирования деформаций изделий во времени при действии термосиловых нагрузок.

Одним из наиболее важных вопросов при расчетах ползучести является вопрос выбора исходной системы уравнений, корректно описывающих деформации ползучести, и построения физически обоснованных моделей.

С целью развития суперкомпьютерных технологий наукоемких отраслей промышленности России в РФЯЦ – ВНИИЭФ разрабатывается высокопроизводительный многофункциональный программный комплекс ЛОГОС [3] решения задач прочности и тепломассопереноса. В статье изложены результаты численного моделирования ползучести титанового сплава ВТ-14 с использованием пакетов ЛОГОС и УПАКС [4]. Разработка и программная реализация алгоритмов математической модели термползучести выполнена на основе работ С.А. Капустина [5–7]. Эталонные результаты экспериментальных исследований ползучести на образцах из тита-

нового сплава ВТ-14 получены М.А. Пуховым в лаборатории СарФТИ НИЯУ МИФИ кафедры ТиЭМ.

1. Модель ползучести

Численное исследование ползучести материалов конструкций в пакете программ ЛОГОС осуществляется на основе составной иерархической модели поврежденно-го материала [8–14] в рамках соотношений механики поврежденной среды [5, 6, 15]. Описание общей модели ползучести и алгоритмы определения входящих в нее материальных функций подробно изложены в [5, 6, 16–19]. В настоящей статье используется модель, основанная на гипотезах существования поверхности ползучести в пространстве девиаторов напряжений σ'_{ij} и градиентальности к ней вектора скорости деформации ползучести $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ [6]. Скорость деформаций ползучести связана с девиатором эффективных напряжений σ'_{ij} соотношениями:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \sigma'_{ij} \cdot L(T, \theta) \cdot H(T, \tau, \theta),$$

где $L(T, \theta) = |\dot{\epsilon}_{ij}^c|/|\sigma'_{ij}|$ – функция, характеризующая начальную скорость ползучести, отнесенную к единичному напряжению при уровне напряжений, определяемых параметром θ :

$$\theta = \frac{|\sigma'_{ij}|}{C_c} - 1,$$

$C_c = C_c(T)$ – радиус поверхности ползучести, зависящий только от температуры; $H(T, \tau, \theta)$ – функция упрочнения, характеризующая изменение начальной скорости ползучести $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ от параметра упрочнения τ ($H(T, \theta, \tau_0) = 1,0$ при $\tau_0 = 0$).

2. Экспериментальные исследования

Исследования ползучести титанового сплава ВТ-14 проводились при температуре 20 °С [20] на универсальной прецизионной испытательной машине Shimadzu AG-X, имеющей два измерительных канала для усилия и перемещения. Машина позволяет развивать усилие до $F_{\max} = 100$ кН в диапазоне изменения скорости перемещения траверсы 0,0005–1000 мм/мин (скорость деформирования в опытах на одноосное растяжение или сжатие $\epsilon' = 10^{-4}$ – 10^2 с⁻¹). Управление испытанием и обработка результатов экспериментов производится программным комплексом Autograph TrapeziumX.

В исследованиях ползучести использовались стандартные образцы цилиндрической формы, закрепленные по зажимной части с одной стороны и нагруженные постоянным усилием в течение времени $t = 30$ часов с другой стороны. Испытание образцов проводилось в два этапа:

- одноосное растяжение образцов;
- ползучесть образцов при выбранных уровнях удельных напряжений.

Испытания серии образцов на одноосное растяжение проходили при скорости деформации $1,4 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹ и позволили получить диаграмму деформирования (рис. 1, сплошная линия) и прочностные характеристики сплава ВТ-14: $\sigma_{0,2} = 678$ МПа, $\sigma_{\text{пл}} = 460$ МПа, $\sigma_{\text{в}} = 764$ МПа. Штриховой линией на рис. 1 отмечена прямая, параллельная упругому участку диаграммы деформирования, проходящая через точку с координатами (0,2; 0), которая необходима для определения предела текучести $\sigma_{0,2}$ материала.

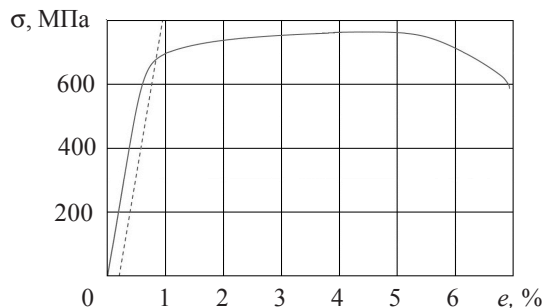


Рис. 1. Диаграмма деформирования сплава ВТ-14

Полученное экспериментальное значение предела текучести $\sigma_{0,2}$ использовалось для оценки осевых усилий, необходимых для выявления предела ползучести при трех уровнях нагружения: $\sigma_0 = 0,6\sigma_{0,2}$, $\sigma_1 = 0,7\sigma_{0,2}$ и $\sigma_2 = 0,8\sigma_{0,2}$, а за предел ползучести сплава ВТ-14 при нормальной температуре $T = 20^\circ\text{C}$ принята величина $\sigma_{cr} = 474,6$ МПа. Испытания в течение 30 часов показали, что при уровне напряжений $\sigma_0 = 406,8$ МПа деформации ползучести отсутствуют. При $\sigma_1 = 474,6$ МПа отмечено проявление эффектов ползучести с минимальной скоростью нарастания деформаций ползучести, а при $\sigma_2 = 542,4$ МПа реализуется эффект установившейся ползучести с ярко выраженными стадиями и постоянной скоростью на протяжении всего времени испытания. Зависимости продольной полной деформации e_c от времени выдержки под нагрузкой t для напряжений $\sigma = 474,6$ МПа и $\sigma = 542,4$ МПа показаны на рис. 2.

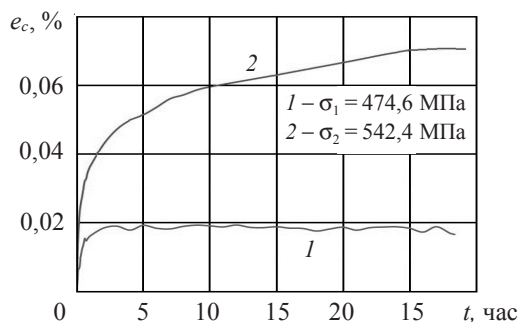


Рис. 2. Диаграмма ползучести сплава ВТ-14 при двух уровнях постоянных напряжений

Эксперименты показывают, что при действии постоянного напряжения $\sigma_1 = 474,6$ МПа в начале испытаний (до 3 часов) зависимость деформаций ползучести от времени монотонно возрастает. Однако при достижении некоторого значения скоростью деформации ползучести отмечается колебательный характер кривой, при этом осредненное значение скорости деформации ползучести на протяжении всего времени испытания близко к нулю. Такое поведение материала объясняется выбором минимального порогового значения величины постоянного напряжения, при котором эффекты ползучести только начинают проявляться.

3. Определение материальных функций

Константы и функции математических моделей материалов, реализованных в пакетах программ УПАКС и ЛОГОС, оснащаются данными на основе выполненных

экспериментов. Одноосное растяжение образцов позволило установить фактические упругие константы сплава ВТ-14 при нормальной температуре: $E = 103,8$ ГПа; $G = 39,9$ ГПа; $K = 86,5$ ГПа – и получить зависимость радиуса поверхности текучести $C_p = C_p(k_p)$ от длины траектории пластической деформации k_p в модели пластичности материала с изотропным упрочнением (табл. 1).

Таблица 1

$k_p, \%$	0	0,010	0,022	0,078	0,153	0,239	0,329	0,516	0,900	1,289
$C_p, \text{МПа}$	449	474	490	527	549	560	569	579	594	603

По полученным экспериментальным данным за пороговый уровень напряжений, при котором процессы ползучести отсутствуют, принята величина $\sigma_c^0 = 460$ МПа, соответствующая пределу пропорциональности; при этом начальный радиус поверхности ползучести $C_c = 375,6$ МПа. Уровням напряжений $\sigma_1 = 474,6$ МПа и $\sigma_2 = 542,4$ МПа соответствуют значения $\theta_1 = 0,0317$ и $\theta_2 = 0,179$. Для получения функций $L(\theta)$, $H^0(t)$ экспериментальные зависимости полных деформаций от времени $e(t)$ перестраиваются в зависимости деформаций ползучести $e_c(t)$: $e_c(t) = e(t) - e(0)$. На основе конечно-разностной аппроксимации для каждого уровня напряжений вычисляются значения производных $\dot{e}_c(t_i) = de_c/dt$ для ряда различных значений времени t_i и предварительные значения функций $H^0(t_i)$:

$$H^0(t_i) = \frac{\dot{e}_c(t_i)}{\dot{e}_c(0)}.$$

Для определения рабочих величин этой функции производится выбор конкретных значений времени t_i , общих для рассмотренных уровней напряжений. На выбранном ряде значений проводится осреднение $H^0(t_i)$ для каждого из напряжений. Функции $L(\theta_k)$ и $l(\theta_k)$ вычисляются на основе соотношений:

$$L(\theta_k) = \frac{3 (\dot{e}_c^0)_k}{2 \sigma_{(k)}}, \quad l(\theta_k) = \ln L(\theta_k).$$

Полученные таким образом предварительные значения функций $L(\theta)$, $H^0(t)$ затем уточняются на основе численных экспериментов ползучести сплава при напряжениях $\sigma_1 = 474,6$ МПа и $\sigma_2 = 542,4$ МПа и сопоставления численных и экспериментальных результатов.

Представленные в таблицах 2 и 3 значения параметров определяют материальные функции модели ползучести $L(\theta)$ и $H^0(t)$ рассматриваемого титанового сплава.

Таблица 2

$t_i, \text{час}$	0	1	2	3	4	8	15	30
$H^0(t_i)$	1,00	0,20	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01	0,003

Таблица 3

$\sigma_k, \text{МПа}$	460,0	474,6	542,4
θ_k	0	0,0317	0,179
$L(\theta_k) \cdot 10^6$	0	0,752	1,546
$l(\theta_k)$	-16,0	-14,1	-13,4

4. Результаты расчетов

Полученные константы и материальные функции модели ползучести материала проверялись путем решения тестовой задачи с одним конечным элементом по программам УПАКС и ЛОГОС и моделированием по ЛОГОС испытания на ползучесть при одноосном растяжении реального образца. Численные эксперименты по обеим программам проводились для постоянного уровня растягивающих напряжений $\sigma_2 = 542,4$ МПа.

При решении тестовой задачи в УПАКС использовался двумерный изопараметрический 8-узловой конечный элемент (КЭ), описывающий плоскую деформацию [5], в ЛОГОС применялся 8-узловой гексаэдр с улучшенными функциями формы. Равномерная нагрузка прикладывалась к одной грани КЭ, противоположная грань жестко закреплялась. Результаты решения тестовой задачи и их сравнение с экспериментальными данными приведены на рис. 3.

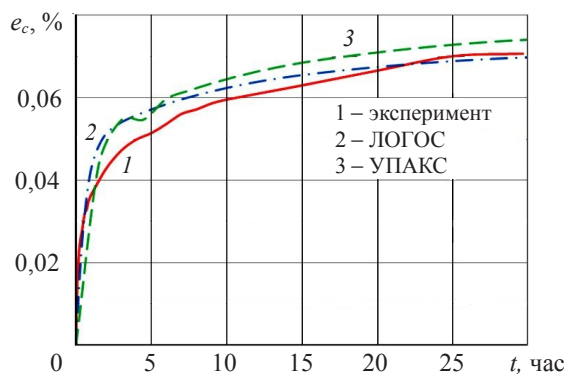


Рис. 3. Зависимость деформации ползучести от времени

Сравнительный анализ показывает, что на ранней стадии ползучести на интервале t_0 от 0 до 1 часа применяемая модель ползучести в сочетании с заданными типами конечных элементов в обеих программах занижает значения деформаций ползучести: в ЛОГОС на 37%, в УПАКС на 62%.

На переходном участке t_1 от 3 до 5 часов обе программы завышают деформации e_c : ЛОГОС на 9%, а УПАКС на 16%. На участке t_2 от 5 до 30 часов отличия решения в ЛОГОС не превышают 5% и стремятся к нулю в конце интервала времени, решение в УПАКС отличается на 11%.

Для расчета ползучести натурального образца при испытании, а также для исследования сходимости решения построены детальные конечно-элементные модели (КЭМ) с различной дискретизацией расчетных областей:

– КЭМ1 – размерностью 61 тыс. из 8-узловых конечных элементов сплошной среды с улучшенными функциями формы с характерным пространственным разрешением $0,9 \times 0,9 \times 0,5$ мм;

– КЭМ2 – размерностью 490 тыс. из 8-узловых конечных элементов сплошной среды с улучшенными функциями формы с характерным пространственным разрешением $0,2 \times 0,2 \times 0,25$ мм;

– КЭМ3 – размерностью 1,6 млн. из 8-узловых конечных элементов сплошной среды с улучшенными функциями формы с характерным пространственным разрешением $0,06 \times 0,06 \times 0,08$ мм.

По результатам исследования сходимости решения, полученным на КЭМ1 и КЭМ2, можно отметить, что расчетные значения деформаций ползучести на обеих моделях практически совпадают, при этом наименьшие отличия результатов экспериментальных данных и моделирования ползучести натурального образца получены на КЭМ3.

Определение значений деформаций ползучести проводилось относительно двух фиксированных точек, расположенных друг от друга на расстоянии 50 мм, соответствующем базе расположения датчика измерения деформаций в эксперименте, и вычислялось по формуле [20]:

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{\Delta l_{\text{сумм}} - \Delta l_{\text{упр}}}{l_0} \cdot 100\%,$$

где $\Delta l_{\text{сумм}}$ – суммарное относительное смещение фиксированных точек образца, $\Delta l_{\text{упр}}$ – смещение фиксированных точек образца по результатам только упругого решения, l_0 – фиксированная база измерения деформаций.

Результаты численных расчетов деформаций ползучести $e_c = e_c(t)$ и сравнение с экспериментальными данными приведены на рис. 4, где красная линия – результаты экспериментов, фиолетовая штрихпунктирная линия – КЭМ1, зеленая штриховая линия – КЭМ2, совпадающая с синей пунктирной линией – КЭМ3.

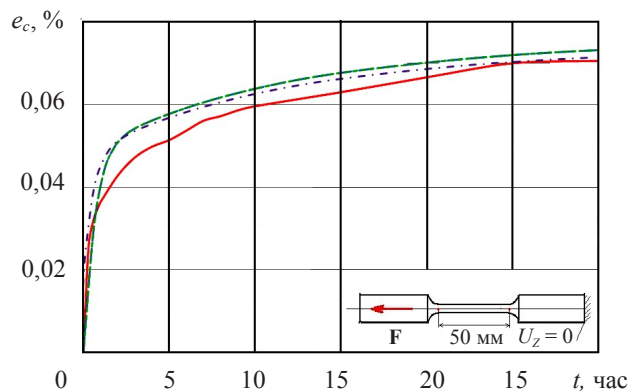


Рис. 4. Зависимость деформации ползучести от времени

Анализ результатов расчетов в ПП ЛОГОС и сравнение с экспериментальными результатами на каждом из трех указанных участков показывает следующие максимальные отличия расчетных деформаций ползучести e_c на КЭМ3 от экспериментальных:

- на первом участке кривой (от 0 до 3 часов) 24%;
- на переходном участке ко второй стадии ползучести (от 3 до 5 часов) 13%;
- на втором участке кривой (от 5 до 30 часов) 8%.

Следует отметить, что расчетные значения деформаций ползучести на конечный момент времени практически совпадают с экспериментальными данными: отличие составило 0,006%.

На рис. 5 показано распределение деформаций ползучести в процентах на момент времени $t = 30$ часов во фрагменте образца при действии постоянного осевого усилия.

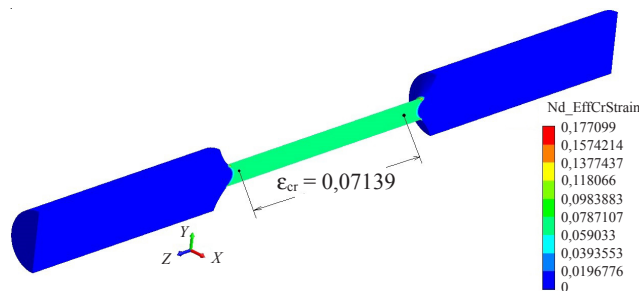


Рис. 5. Деформации ползучести в расчетной модели образца в процентах

Заключение

Выполнено экспериментальное исследование ползучести сплава ВТ-14, по результатам которого определены материальные функции модели ползучести, реализованные в программных комплексах ЛОГОС и УПАКС.

Проведено имитационное моделирование деформирования цилиндрического образца на основе модели ползучести, предложенной С.А. Капустиным.

Исследована сходимость решения задачи на трех конечно-элементных моделях с различной пространственной дискретизацией расчетных областей.

Расчетные значения деформаций ползучести на конечный момент времени практически совпадают с экспериментальными данными. Отличие результатов определения деформаций составило 0,006%.

По результатам моделирования можно отметить хорошее качественное соответствие результатов расчетов эксперименту, что, в свою очередь, является результатом корректного определения набора материальных функций для модели ползучести.

Список литературы

1. Малинин Н.Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести*. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
2. Локощенко А.М. *Ползучесть и длительная прочность металлов*. М.: Физматлит, 2016. 504 с.
3. Рябов А.А., Величко С.В., Волков А.Ю., Володина Н.А., Дьянов Д.Ю., Корсакова Е.И., Косарим С.С., Куделькин В.Г., Авдеев П.А., Артамонов М.В., Борляев В.В. Параллельный пакет программ ЛЭГАС-ДК для расчета задач гидрогазодинамики и прочности на неструктурированных сетках в лагранжево-эйлеровых переменных. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2011. №4. Ч. 5. С. 2472–2473.
4. Батанин М.А., Ботенкова Л.Г., Егунов В.В., Капустин С.А., Рябов А.А., Чурилов Ю.А. Вычислительный комплекс исследования нестационарных термомеханических процессов деформирования и разрушения оболочечных конструкций. *Труды XVI Международной конференции по теории оболочек и пластин*. Нижний Новгород, 1994. Т. 3. С. 31–37.
5. 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, 2015. 347 с.
6. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. *Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций*. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. 226 с.
7. Бех О.И., Коротких Ю.Г. Уравнения механики поврежденной среды для циклических неізотермических процессов деформирования материалов. *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения*. 1989. С. 28–37.

8. Вяткин Ю.А., Капустин С.А., Ярилина И.А. Моделирование поведения конструкций из материалов, свойства которых зависят от текущего вида НДС. *Проблемы прочности и пластичности*. 2002. Вып. 64. С. 125–130.

9. Вяткин Ю.А., Капустин С.А., Кулагин Ю.М. Моделирование поведения разномодульных материалов на основе гипотез разрыхления вследствие сдвигового деформирования. *Приволжский научный журнал*. 2010. №1 (13). С. 12–18.

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

11. Капустин С.А. Численный анализ упруговязкопластических процессов деформирования и разрушения конструкций при квазистатических силовых, тепловых и радиационных воздействиях. *Ученые записки Казанского университета. Физико-математические науки*. 2010. Т. 152. Кн. 4. С. 146–157.

12. Горохов В.А., Егунов В.В., Игумнов Л.А., Казаков Д.А., Капустин С.А. *Экспериментально-теоретическое изучение процессов деформирования и разрушения конструкционных материалов*. Электронное учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: ННГУ, 2012. 54 с.

13. Горохов В.А., Казаков Д.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Моделирование ползучести жаропрочных сплавов при высоких температурах и нейтронном облучении. *Актуальные проблемы прочности: Сборник тезисов LVII Международной конференции*. Севастополь. 24–27 мая 2016 г. Севастополь: СевГУ, 2016. С. 50.

14. Капустин С.А., Горохов В.А., Васильев Б.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б., Осетров Д.Л., Марголин Б.З., Гуленко А.Г. Сравнительный анализ радиационно-термического формоизменения отражателей реакторов БН-600 и БН-800 по результатам численного моделирования. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2011. №6. С. 99–107.

15. Волков И.А., Коротких Ю.Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями*. М.: Физматлит, 2008. 424 с.

16. Капустин С.А., Чурилов Ю.А., Горохов В.А. *Методические основы и алгоритмы компьютерного моделирования процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций при квазистатических термосиловых нагрузениях*. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2014. 111 с.

17. 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.

18. Капустин С.А., Лихачева С.Ю. *Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов с периодически повторяющейся структурой*. Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2012. 48 с.

19. Горохов В.А., Казаков Д.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А. Алгоритмы численного моделирования процессов деформирования и разрушения конструкций в рамках соотношений механики поврежденной среды. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2016. №4. С. 86–105.

20. *Металлы. Метод испытания на ползучесть. Государственный стандарт Союза ССР. ГОСТ 3248-81*. М.: Изд-во стандартов, 1988. 9 с.

References

1. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti [Applied Theory of Plasticity and Creep]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1975. 400 p. (In Russian).
2. Lokoshenko A.M. *Polzuchest i dlitel'naya prochnost metallov [Creep and Durability of Metals]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2016. 504 p. (In Russian).
3. Ryabov A.A., Velichko S.V., Volkov A.Y., Volodina N.A., Dyanov D.Y., Korsakova E.I., Kosarim S.S., Kudelkin V.G., Avdeev P.A., Artamonov M.V., Borlyayev V.V. Parallelniy paket programm LEGAK-DK dlya rascheta zadach gidrogazodinamiki i prochnosti na nestrukturirovannikh setkakh v lagranzhevo-eylerovikh peremennikh [Parallel software package LEGAK-DK for calculating the problems of fluid dynamics and strength on unstructured grids in the Lagrangian –

Eulerian variables]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im N.I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod]. Nizhny Novgorod. NNGU Publ. 2011. No 4. Iss. 5. P. 2472–2473 (In Russian).

4. Batanin M.A., Botenkova L.G., Egunov B.V., Kapustin S.A., Ryabov A.A., Churilov Yu.A. Vychislitelnyy kompleks issledovaniya nestatsionarnykh termomekhanicheskikh protsessov deformirovaniya i razrusheniya obolocheknykh konstruktsiy [Computational complex for studying nonstationary thermomechanical processes of deformation and destruction of shell structures]. *Trudy XVI Mezhdunarodnoy konferentsii po teorii obolochek i plastin* [Proceedings of the XVI International Conference on the Theory of Shells and Plates]. Nizhny Novgorod. 1994. Vol. 3. P. 31–37 (In Russian).

5. Kapustin S.A., Churilov Yu.A., Gorokhov V.A. Modelirovanie nelineynogo deformirovaniya i razrusheniya konstruktsiy v usloviyakh mnogofaktornykh vozdeystviy na osnove MKE [Simulation of Nonlinear Deformation and Fracture of Structures under Conditions of Multifactor Effects Based on FEM]. Nizhny Novgorod. NNGU Publ. 2015. 347 p. (In Russian).

6. Kazakov D.A., Kapustin S.A., Korotkikh Yu.G. Modelirovanie protsessov deformirovaniya i razrusheniya materialov i konstruktsiy [Modeling the Processes of Deformation and Destruction of Materials and Structures]. Nizhny Novgorod. NNGU Publ. 1999. 226 p. (In Russian).

7. Beh O.I., Korotkikh Yu.G. Uravneniya mekhaniki povrezhdennoy sredy dlya tsiklicheskikh neizotermicheskikh protsessov deformirovaniya mate [Equations of mechanics of a damaged medium for cyclic non-isothermal processes of material deformation]. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti. Metody resheniya* [Applied Problems of Strength and Plasticity. Solution Methods]. 1989. P. 28–37 (In Russian).

8. Vyatkin Yu.A., Kapustin S.A., Yarilina I.A. Modelirovanie povedeniya konstruktsiy iz materialov, svoystva kotorih zavisyat ot tekushchego vida NDS [Modelling of structure behaviour of materials the properties of which depend on SSS]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2002. Vol. 64. P. 125–130 (In Russian).

9. Vyatkin Yu.A., Kapustin S.A., Kulagin Yu.M. Modelirovanie povedeniya raznomodulnih materialov na osnove gipotez razrihneniya vsledstvie sdvigovogo deformirovaniya [Modeling the behavior of multi-modular materials based on the hypothesis of loosening due to shear deformation]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal]. 2010. No 1(13). NNGASU Publ. 2010. P. 12–18 (In Russian).

10. Kapustin S.A., Churilov Yu.A., Gorokhov V.A. Chislennoe modelirovanie protsessov deformirovaniya i razrusheniya materialov i konstruktsiy v usloviyakh kvazistaticheskikh termosilovykh i termoradiatsionnykh vozdeystviy [Numerical modeling of the processes of deformation and destruction of materials and structures under conditions of quasistatic thermo forces and thermoradiation effects]. *Sovremennye problemy resursa materialov i konstruktsiy: Trudy III shkoly-seminara* [Current Problems of Resource Materials and Designs. Proceedings of the Third School of Seminar]. Moscow. MAMI. 2009. P. 90–104 (In Russian).

11. Kapustin S.A. Chislenniy analiz vyazkouprugoplasticheskikh protsessov deformirovaniya i razrusheniya konstruktsiy pri kvazistaticheskikh silovih, teplovih i radiatsionnykh vozdeystviy [Numerical analysis of elastic-viscoplastic processes of deformation and fracture of structures under quasistatic force, thermal and radiation effects]. *Uchenie zapiski Kazanskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki* [Proceeding of Kazan University. Physics and Mathematics Series]. 2010. Vol. 152. Book 4. P. 146–157 (In Russian).

12. Gorokhov V.A., Egunov V.V., Igumnov L.A., Kazakov D.A., Kapustin S.A. Eksperimentalno-teoreticheskoe izuchenie protsessov deformirovaniya i razrusheniya konstruktsionnykh materialov. [Experimental and theoretical study of the processes of deformation and fracture of structural materials]. Elektronnoe uchebno-metodicheskoe posobie [Electronic Teaching Aid]. Nizhny Novgorod. NNGU Publ. 2012. 54 p. (In Russian).

13. Gorokhov V.A., Kazakov D.A., Kapustin S.A., Churilov Yu.A. Modelirovanie polzuchesti zharoprochnykh splavov pri vysokikh temperaturakh i neytronnom obluchenii [Simulation of creep of high-temperature alloys at high temperatures and neutron irradiation]. *Aktualnye problemy prochnosti: Sbornik tezisov LVII Mezhdunarodnoy konferentsii. Sevastopol. 24–27 may. 2016* [Collection of Abstracts of the LVII International Conference]. Sevastopol. SevGU. 2016. P. 50 (In Russian).

14. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Vasilyev B.A., Vilenskiy O.Yu., Kaydalov V.B., Osetrov D.L., Margolin B.Z., Gulenko A.G. Sravnitelnyy analiz radiatsionno-termicheskogo formoizmeneniya otrazhately reaktorov BN-600 i BN-800 po rezultatam chislennogo modelirovaniya [Comparative analysis of the radiation-thermal change of reflectors of the reactors BN-600 and BN-800 according to the results of numerical simulation]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2011. No 6. P. 99–107 (In Russian).

15. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Uravneniya sostoyaniya vyzkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami* [Equations of State of Viscoelastoplastic Media with Damage]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 424 p. (In Russian).

16. Kapustin S.A., Churilov Yu.A., Gorokhov V.A. *Metodicheskie osnovy i algoritmy kompyuternogo modelirovaniya protsessov deformirovaniya i razrusheniya materialov i konstruktivnykh pri kvazistaticheskikh termosilovykh nagruzheniyakh* [Methodical Foundations and Algorithms for Computer Modeling of the Processes of Deformation and Fracture of Materials and Structures under Quasistatic Thermal-force Loading]. Nizhny Novgorod. NNGU Publ. 2014. 111 p. (In Russian).

17. Kapustin S.A., Kazakov D.A., Churilov Yu.A., Galushchenko A.I., Vahterov 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. Vol. 70. P. 98–108 (In Russian).

18. Kapustin S.A., Likhacheva S.Yu. *Modelirovanie protsessov deformirovaniya i razrusheniya materialov s periodicheskimi povtoryayushcheyami strukturami* [Modeling the Processes of Deformation and Fracture of Materials with a Periodically Repeating Structure]. Nizhny Novgorod. NNGASU Publ. 2012. 48 p. (In Russian).

19. Gorokhov V.A., Kazakov D.A., Kapustin S.A., Churilov Yu.A. Algoritmy chislennogo modelirovaniya protsessov deformirovaniya i razrusheniya konstruktivnykh v ramkakh sootnosheniya mekhaniki povrezhdennoy sredy [Algorithms for numerical simulation of structures deformation and fracture within relations of damaged medium mechanics]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika* [Perm National Research Polytechnic University Mechanics Bulletin]. 2016. No 4. P. 86–105 (In Russian).

20. *Metally. Metod ispytaniya na polzuchest. Gosudarstvennyy standart Soyuz SSR. GOST 3248-81*. [Metals. Creep Test Method. State Standard of the USSR. GOST 3248-81]. Moscow. Standart Publ. 1988. 9 p. (In Russian).

THE EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF TITANIUM ALLOY VT-14 CREEP

Ryabov A.A.¹, Romanov V.I.¹, Vyatkin Yu.A.^{1,2}, Pukhov M.A.^{1,2},
Kapustin S.A.³, Gorokhov V.A.³

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

²Sarov Physics and Technical Institute of National Research Nuclear University MEPhI,
Sarov, Russian Federation

³Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Currently, the RFNC-VNIIEF are developing a highly productive multifunctional software complex LOGOS for analyzing problems of strength and heat-and-mass transfer for developing supercomputer technologies of high-tech industries in Russia. One of the promising directions of developing the LOGOS complex is developing a creep module. The paper presents the results of experimentally and numerically analyzing the creep behavior of the VT-14 titan alloy. The development and software implementation of the algorithms of the mathematical model of thermal creep was done based on the works by S.A. Kapustin. The benchmark results of experimentally

studying creep using cylindrical specimens of the VT-14 titan alloy were obtained in the laboratory of SPTI of NRNU MEPhI. Standard cylindrical specimens were used, that were secured along the fixing part on the one end and loaded with a constant force. The test was controlled and the experimental results were processed using the Autograph TrapeziumX software complex. The numerical studies were done using the LOGOS and UPAKS software complexes. The methods of determining the parameters of material functions based on the experimental results are described. A comparative analysis of the numerical and experimental results on the creep of a cylindrical specimen subjected to constant long loading was done. Creep of the VT-14 titan alloy was studied at the universal high-precision test machine Shimadzu AG-X having two reassuring channels: for forces and displacements. The material functions of the creep model were determined by the results of the experimental study.

Keywords: experiment, numerical simulation, creep test, diagram, finite-element model, boundary conditions, deformation of creep, strain rate, material functions.