

УДК 539.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ  
ПОВЕДЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА  
В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ<sup>\*)</sup>**

**С.А. Капустин<sup>1</sup>, Д.А. Казаков<sup>1</sup>, Ю.А. Чурилов<sup>1</sup>,  
А.И. Галущенко<sup>2</sup>, А.М. Вахтеров<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Нижний Новгород, <sup>2</sup>Саров*

Обсуждается комплекс экспериментальных и методических средств, используемых для моделирования процессов деформирования и разрушения изделий из жаропрочного сплава ВЖ-159 (разработан ФГУП "ВИАМ"). Предложены модели, описывающие поведение таких материалов в условиях квазистатических термосиловых нагружений. Рассмотрены вопросы построения материальных функций предложенных моделей и проведена их верификация на примерах восстановления кривых одноосного деформирования и ползучести сплава при различных температурах. Представлены результаты численного моделирования упруговязкопластического поведения фрагмента конструкции при действии меняющихся в заданной последовательности температур, распределенных нагрузок и выдержки под нагрузкой.

Исследование поведения изделий из жаропрочных сплавов, работающих в условиях высоких нагрузок и температур, требует решения комплекса взаимосвязанных вопросов экспериментального и теоретического характера. В частности, должны быть экспериментально изучены основные закономерности поведения изучаемого сплава в заданном диапазоне изменения нагрузок и температур и созданы соответствующие математические модели, выполнены эксперименты для получения материальных функций предложенных моделей и проведены исследования по оценке адекватности моделей с использованием полученных функций. Также должны быть созданы методика и соответствующие программные средства, позволяющие исследовать на основе предложенных моделей конкретные изделия при заданных законах изменения силовых и температурных воздействий. Все перечисленные задачи должны решаться согласованно и в строгой увязке получаемых результатов с конечной целевой функцией исследования. В настоящей статье обсуждаются результаты такого комплекса исследований для моделирования процессов деформирования и разрушения изделий из жаропрочного сплава ВЖ-159 в условиях квазистатических термосиловых нагружений.

Исследования сплава при высокотемпературных воздействиях включали в себя эксперименты по построению кривых одноосного деформирования материала в

---

<sup>\*)</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 06-08-00360-а, 07-08-13637-офи\_ц) и Министерства образования и науки РФ (грант Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-3367.2008.8).

диапазоне температур от 20 до 850 °С, необходимые для получения стандартных физико-механических характеристик материала ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ), "базовые эксперименты", необходимые для получения материальных функций используемой модели термопластичности, а также эксперименты по построению кривых ползучести для заданных уровней напряжений и температур.

Проведение экспериментов, связанных с получением стандартных физико-механических характеристик сплава, и "базовых экспериментов" в диапазоне температур от 20 до 850 °С осуществлялось на автоматизированном стенде, состоящем из испытательной установки УМЭ-10ТМ и измерительно-управляющей системы National Instruments (NI).

Программа "базовых экспериментов" заключалась в проведении управляемого эксперимента по растяжению образца с промежуточными циклами разгрузки и обратного нагружения сжатием до предела текучести. В каждом цикле данной программы нагружения устанавливался допуск  $\Delta = 0,1\%$  на остаточную деформацию петли гистерезиса. С заданным допуском в цикле определялись следующие характеристики:  $\sigma_i^+$  – предел текучести при растяжении,  $\sigma_i^-$  – предел текучести при сжатии,  $e_i^p$  – соответствующая им остаточная деформация. Максимальная остаточная деформация для всей программы нагружения составляла  $\sim 2-2,5\%$ . Результатом каждого испытания являлись зависимости прямых и обратных пределов текучести от соответствующей накопленной остаточной деформации:  $\sigma_i^+ \sim e_i^p$  и  $\sigma_i^- \sim e_i^p$ .

Каждый из образцов после окончания программы "базового" эксперимента доводился до разрушения, и затем строилась соответствующая диаграмма деформирования. Кривые деформирования материала при температурах  $T = 20, 400, 750$  и  $850$  °С, полученные на основе эксперимента, представлены пунктирными линиями на рис. 1–4 соответственно.

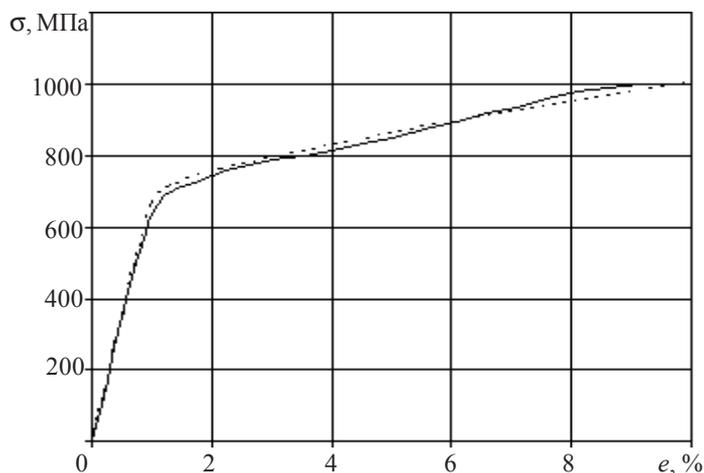


Рис. 1

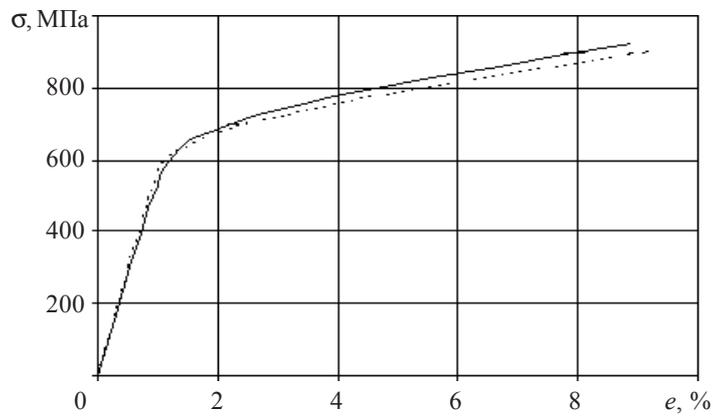


Рис. 2

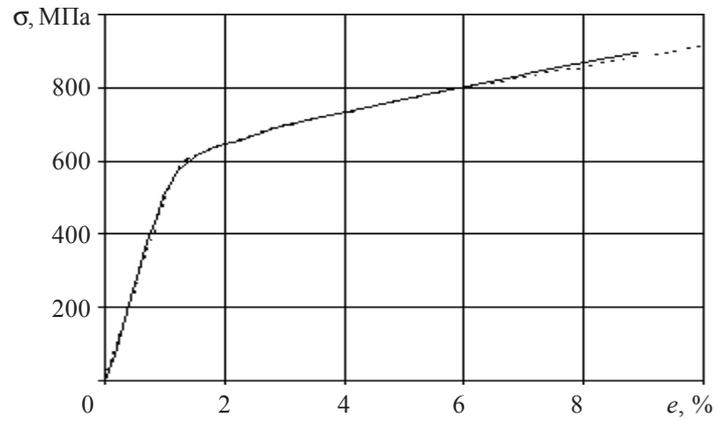


Рис. 3

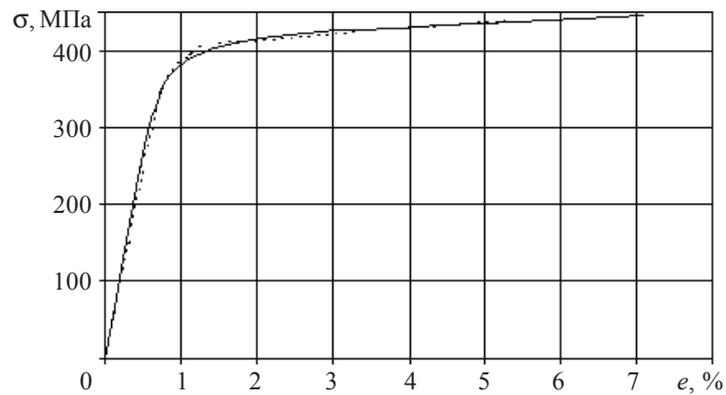


Рис. 4

Испытания на ползучесть проводились на модернизированной установке АИМА-5-1 при постоянной (в пределах данного опыта) растягивающей силе и температуре в соответствии с ГОСТ 3248-60 и 10145-81.

Нагружающее устройство машины представляло собой трехрычажную систему с передаточным отношением рычагов 1:100 (1:7). Поддержание рабочего положения качающегося рычага – автоматическое (с помощью двух светодиодов). Для поддержания заданной температуры использовалась трехсекционная муфельная печь с устройством автокоррекции теплового поля в зоне нагрева испытываемого образца.

Измерения удлинения рабочей части образцов осуществлялись с помощью тензометрического преобразователя (специальная пластина с наклеенными тензодатчиками), который совместно с измерительной системой ПИ позволял регистрировать в цифровом виде искомую диаграмму  $e^c = e_{11}^c \sim t$  на ЭВМ. Предварительная тарировка тензометрического моста пластины датчика перемещений проводилась на тарировочном устройстве с помощью математического обеспечения системы ПИ (точность – 0,05 мм).

Форма образца – цилиндрическая, с резьбовыми головками ( $L_0$  – длина рабочей части  $\sim 30$  мм,  $d_0$  – диаметр рабочей части  $\sim 5$  мм).

Экспериментальные кривые ползучести, полученные при  $T = 600, 750, 850$  °С и уровнях напряжений  $\sigma = 762, 219$  и  $96$  МПа, представлены пунктирными линиями на рис. 5–7 соответственно.

Описание процессов упруговязкопластического деформирования и разрушения конструкций при высокотемпературных квазистатических нагружениях строится на основе составной иерархической модели поврежденного материала. В основу этой модели положена возможность представления сложного процесса развития взаимосвязанных эффектов деформирования и разрушения в виде последовательности формально независимых элементарных актов, описываемых соответствующими частными моделями пластичности, ползучести и накопления повреждений.

В настоящем исследовании в качестве частной модели, описывающей упруго-пластическое поведение материала, используется вариант модели термопластичности с комбинированным упрочнением, в котором радиус поверхности текучести  $C_p$  представляется в виде функции, зависящей от температуры  $T$  и накопленной пластической деформации, характеризуемой параметром Одквиста  $k_p$ :

$$C_p = C_p(T, k_p), \quad (1)$$

$$k_p = \bar{k}_p + \Delta k_p; \quad \Delta k_p = \left( \frac{2}{3} \Delta e_{ij}^p \Delta e_{ij}^p \right)^{1/2}.$$

Компоненты тензора микронапряжений  $\rho_{ij}$  связаны с изменением температуры  $\Delta T$  и пластических деформаций  $\Delta e_{ij}^p$  соотношением

$$\Delta \rho_{ij} = g_1 \Delta e_{ij}^p + g_2 \rho_{ij} \Delta k_p + g_T \rho_{ij} \langle \Delta T \rangle, \quad (2)$$

где  $g_1(T), g_2(T), g_T(T)$  – материальные функции, определяемые на основе проведения соответствующих экспериментов;  $\langle \Delta T \rangle = \Delta T$  при  $\Delta T > 0$ ,  $\langle \Delta T \rangle = 0$  при  $\Delta T < 0$ .

В качестве частной модели, описывающей процессы высокотемпературной ползучести, используется модель, основанная на гипотезе существования поверхности ползучести и градиентальности к ней вектора скорости деформации ползучести, аналогичная рассмотренной в [1]:

$$\dot{e}_{ij}^c = \lambda S_{ij} = L(T, \Psi) H(T, q, \Psi) \sigma'_{ij}, \quad (3)$$

$$\Psi = (\sigma'_{ij} \sigma'_{ij} - (C_0)^2) / (C_0)^2, \quad (4)$$

где  $C_0 = C_0(T)$  – радиус начальной поверхности ползучести, зависящий только от уровня температуры;  $L(T, \psi) = \dot{\epsilon}_{ij}^c / \sigma'_{ij}$  – функция, характеризующая начальную скорость ползучести, отнесенную к единичному напряжению при уровне напряжений, определяемых параметром  $\psi$ ;  $H(T, q, \psi)$  – функция упрочнения, характеризующая изменение начальной скорости ползучести  $\dot{\epsilon}_{ij}^c$  от параметра упрочнения  $q$ . В качестве последнего в данной модели принято время ползучести:  $q = t$ .

В отличие от варианта модели ползучести, описанного в [1], функция  $H(T, q, \psi)$  здесь зависит не только от параметров  $T$  и  $q$ , но и от уровня действующих напряжений, характеризуемого параметром  $\psi$ .

Описание процессов накопления повреждений, связанных с развитием деформаций пластичности и ползучести, строится в предположении, что разрушение материала в некоторой точке происходит при достижении энергией повреждения  $W$  критического значения  $W = W^R$ . Конкретный вид этой энергии зависит от вида повреждения и представляет собой работу части тензора напряжений на необратимых деформациях.

Поскольку величина  $W^R$  зависит от материала, вида напряженно-деформированного состояния (НДС) и температуры  $T$ , для описания текущего состояния поврежденности наряду с энергией  $W$  в рассмотрение вводится функция поврежденности  $\Psi$ , представляющая собой нормированный аналог энергии  $W$ . Для неповрежденного материала  $\Psi = 0$ , в процессе разрушения  $\Psi$  увеличивается до предельного значения  $\Psi = 1$ .

Изменение функции поврежденности  $\Delta\Psi$  связано с изменением энергии  $W$  при фиксированном виде НДС, характеризуемом значением параметра  $\Pi$ , соотношением

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

При развитии в материале одновременно нескольких видов повреждений для описания каждого вида используется своя функция  $\Psi = \Psi_m$ . Наряду с функцией  $\Psi$ , для описания влияния текущего уровня поврежденности на характеристики процесса деформирования в рассматриваемой модели поврежденного материала вводится скалярная мера поврежденности  $\omega$ . Она рассматривается как величина, инвариантная по отношению к виду поврежденности, виду НДС и траекториям нагружения, причем изменение ее  $\Delta\omega$  складывается из изменений  $\Delta\omega_m$  мер поврежденности каждого вида, то есть

$$\Delta\omega = \sum \Delta\omega_m. \quad (6)$$

Вычисление изменений функций поврежденности  $\Delta\Psi_m$  и вклада их в изменение меры поврежденности  $\Delta\omega_m$  осуществляется в соответствующих частных моделях поврежденности на основе принятого алгоритма суммирования повреждений [1].

В настоящем исследовании в качестве энергии разрушения  $W_1$  при пластическом деформировании принимается энергия пластического разрыхления. Величина изменения этой энергии  $\Delta W_1$  при монотонном пластическом деформировании определяется изменением пластических деформаций  $\Delta e_{ij}^p$  и текущим значением тензора микронапряжений  $\rho_{ij}$  [1]:

$$\Delta W_1 = \rho_{ij} \Delta e_{ij}^p. \quad (7)$$

Величина предельной энергии  $W_1^R$  определяется в виде

$$W_1^R = f_1(\Pi) W_0^R(T), \quad (8)$$

где  $W_0^R(T)$  – предельная энергия пластического разрыхления при одноосном растяжении,  $f_1(\Pi)$  – функция вида НДС ( $0 \leq f_1(\Pi) < \infty$ ), определяемая на основе аппроксимации данных экспериментов [1].

В качестве энергии, контролирующей процесс накопления повреждений при ползучести, принимается доля энергии диссипации  $W_2$ , изменение которой связано с изменением деформаций ползучести:

$$\Delta W_2 = \sigma'_{ij} \Delta e_{ij}^c.$$

Для нахождения предельной энергии  $W_2^R$  используется соотношение

$$W_2^R = f_2(\Pi) V_0^R(T), \quad (9)$$

где  $V_0^R = V_0^R(T)$  – предельное значение энергии диссипации ползучести при одноосном растяжении,  $f_2(\Pi)$  – экспериментально определяемая функция вида НДС ( $0 \leq f_2(\Pi) < \infty$ ).

Численное решение задач осуществляется на основе метода конечных элементов (МКЭ) путем пошагового интегрирования разрешающих уравнений, записанных для текущей конфигурации конструкции. С этой целью процесс нагружения конструкции для каждой из ее точек представляется в виде соответствующего набора траекторий нагружения. Каждая из траекторий представляет собой кривую в пространстве параметров нагружения, независимыми координатами которого являются время, температура, а также компоненты разложения по пространственным осям векторов объемных сил, поверхностных сил и граничных перемещений. При дискретизации процесса нагружения величина приращений внешних воздействий (этапов нагружения) определяется условиями удовлетворительной аппроксимации истинной траектории нагружения совокупностью прямолинейных участков (то есть линейным изменением в них функций нагружения). Наряду с этим для сохранения точности решения задачи без введения дополнительного итерационного процесса по уточнению начального состояния деформируемой системы вводится дополнительный уровень дискретизации процесса по параметру нагружения в виде подэтапов нагружения. Подэтап представляет собой отдельный шаг нагружения, эквивалентный по своим функциям шагу верхнего уровня (этапу нагружения) с регламентацией размера, определяемого максимальной величиной возникающих на этом шаге приращений деформаций. Размер подэтапа либо находится путем разбиения текущего этапа на заданное число интервалов, либо вычисляется автоматически, исходя из заданной величины приращений деформаций. Для определения изменения необратимых деформаций в пределах этапов (подэтапов) нагружения используется внутренняя шаговая схема [1].

Численное решение линеаризованных задач осуществляется на основе МКЭ с использованием рассмотренных в [1] моделей изопараметрических конечных элементов (КЭ) с сирендиповой аппроксимацией поля перемещений. Изложенные методические положения реализованы в составе программных средств ВК УПАКС [2].

Построение материальных функций предложенных моделей для материала типа ВЖ-159 производилось на основе описанных выше экспериментальных результатов. Материальные функции представлялись в виде таблиц, содержащих значения функ-

ций в зависимости от аргументов: температуры  $T$ , параметра длины траектории пластической деформации  $k_p$ , времени ползучести  $t$  и параметра  $\Theta$ , характеризующего уровень напряжений при ползучести.

Верификация рассматриваемых моделей и полученных на основе обработки экспериментальных данных материальных функций осуществлялась путем восстановления на основе численного моделирования исходных экспериментальных кривых.

Сравнение кривых деформирования материала ВЖ-159 в условиях одноосного растяжения при температурах 20, 400, 750 и 850°C, полученных на основе численного моделирования (сплошные линии) и эксперимента (пунктирные линии), представлено на рис. 1–4 соответственно.

На рис. 5–7 представлены кривые ползучести для температур 600, 750, 850°C и уровней напряжений  $\sigma = 762, 219$  и 96 МПа соответственно, полученные экспериментально (пунктирные линии) и на основе численного моделирования (сплошные линии).

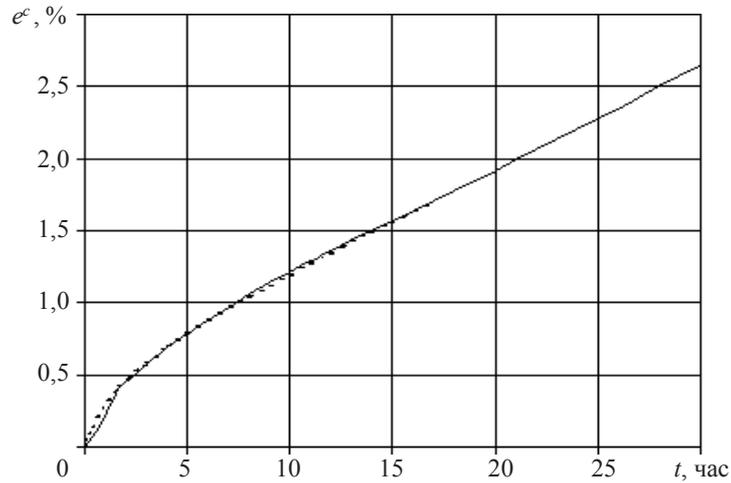


Рис. 5

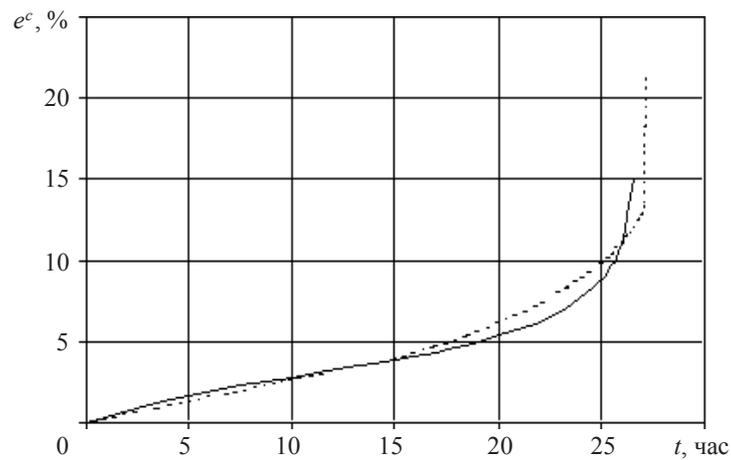


Рис. 6

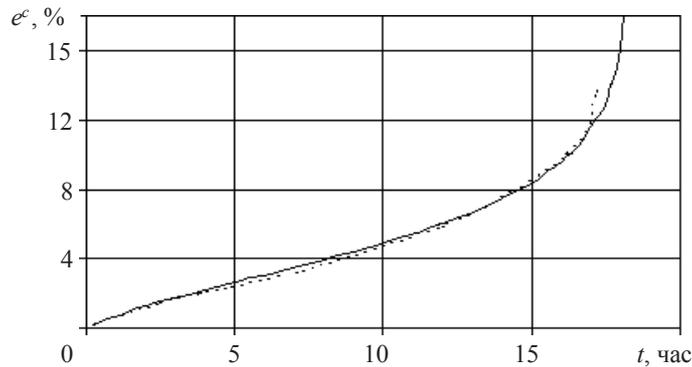


Рис. 7

Наблюдаемое соответствие результатов численного моделирования с экспериментальными данными свидетельствует об их хорошем согласовании.

Комплексная проверка разработанных методических и программных средств осуществлялась на примере расчета конструкции, находящейся под действием температурного поля, неравномерно распределенного по ее объему, давления, распределенного по ее внутренней поверхности, и последующей выдержки под нагрузкой в течение заданного времени.

Исследуемый фрагмент конструкции представлял собой цилиндрическую оболочку, подкрепленную толстостенным днищем с центральным отверстием, внутренним кольцевым ребром, расположенным вблизи днища, а также внешним кольцевым ребром меньшей жесткости, расположенным в средней части цилиндра.

Задача решалась в осесимметричной постановке. Анализ поведения конструкции осуществлялся за 3 этапа нагружения. На первом этапе производились нагрев конструкции и нагружение внутренним давлением. На последующих этапах рассматривалось поведение конструкции в процессе выдержки.

Второй этап, на котором ожидалась наибольшая интенсивность деформации ползучести, разбивался на 10 временных шагов (подэтапов) протяженностью  $\Delta t = 0,5$  часа каждый.

Третий этап представлялся в виде совокупности 25 временных шагов протяженностью  $\Delta t = 1$  час.

Схема КЭ-дискретизации фрагмента выбиралась на основе предварительного анализа распределения и кинетики изменения напряжений и деформаций ползучести в наиболее нагруженных зонах. Полученная в результате сетка КЭ-разбиения всего фрагмента показана на рис. 8. Детализация этой сетки в области перехода цилиндрической части фрагмента в днище показана на рис. 9.

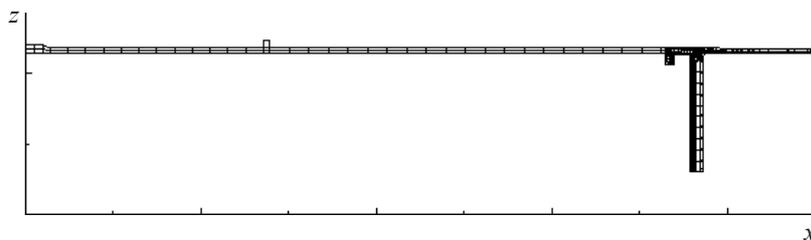


Рис. 8

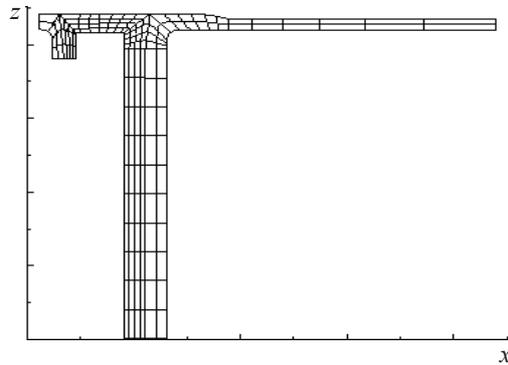


Рис. 9

В процессе изучения НДС конструкции на этапе термосилового нагружения появления пластических деформаций в материале не наблюдалось. Результаты решения задачи на этапах выдержки приведены на рис. 10–14.

На рис. 10 показана деформированная конфигурация конструкции, а на рис. 11 – эпюры распределения деформации ползучести (длины траектории деформации ползучести  $k_c$ ) вдоль наружной и внутренней поверхностей конструкции к моменту времени  $t = 30$  часов.

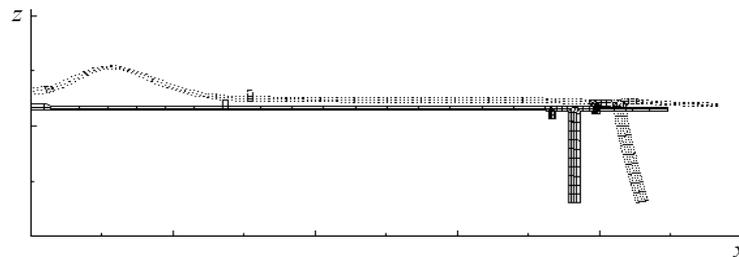


Рис. 10

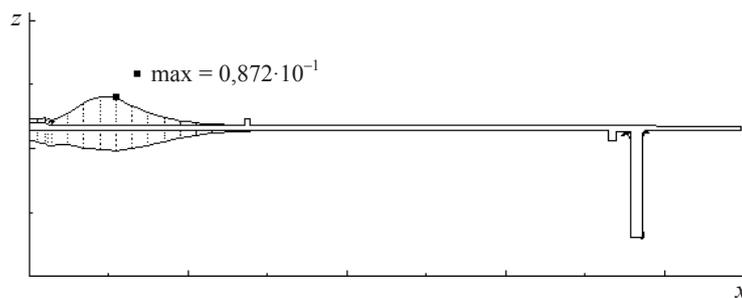


Рис. 11

В более крупном масштабе области развития деформации ползучести в наружных волокнах толстостенного днища по кромке отверстия (зона 1) и в районе сопряжения днища с цилиндром на его внутренней поверхности (зона 2) для этого же момента времени показаны на рис. 12.

На рис. 13 показана детализация эпюр ползучести в районе действия максимальных температур ( $T \geq 850^\circ\text{C}$ ) в цилиндрической части конструкции (зона 3), а на рис. 14 – аналогичные эпюры распределения меры поврежденности  $\omega$ .

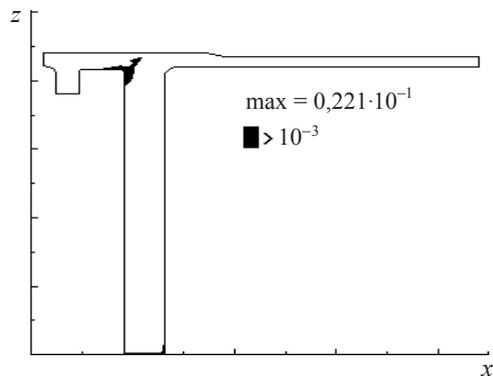


Рис. 12

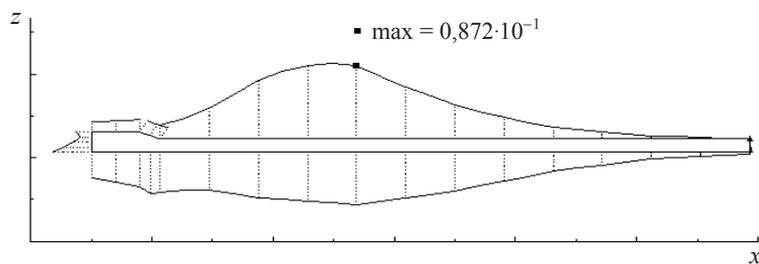


Рис. 13

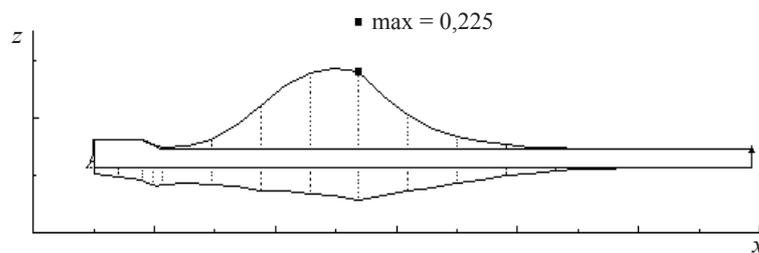


Рис. 14

На основе анализа результатов численного моделирования поведения конструкции в процессе выдержки ее под нагрузкой установлено следующее.

На начальной стадии процесса выдержки наиболее интенсивный рост деформаций ползучести имел место в зоне 2, несколько меньший – в зоне 1 и еще меньший – в зоне 3. С течением времени за счет перераспределения напряжений скорость их роста в зонах 1 и 2 уменьшалась. В зоне 3 характер распределения напряжений по толщине оболочки близок к безмоментному, поэтому возможности перераспределения напряжений в процессе ползучести здесь весьма ограничены и деформации в этой зоне развивались достаточно интенсивно. К моменту времени  $t = 10$  часов максимальная величина деформаций ползучести в зоне 3 ( $k_c \cong 2,2\%$ ) превысила аналогичную величину в зоне 2 ( $k_c \cong 2,0\%$ ). В процессе дальнейшей выдержки под нагрузкой скорость деформаций ползучести в зоне 3 начала возрастать за счет развития поврежденности, которая к концу выдержки под нагрузкой достигла величины  $\omega \cong 22,5\%$ . Максимальные значения деформаций ползучести в этой зоне составили  $k_c \cong 4,5\%$  при  $t = 20$  часов и  $k_c \cong 8,7\%$  при  $t = 30$  часов.

Согласно представленным выше количественным оценкам параметров ползучести и поврежденности материала наиболее опасным с точки зрения нарушения прочности участком конструкции оказывается зона 3. Однако не менее опасной зоной следует считать узел сопряжения цилиндра с массивным днищем (зона 2). Несмотря на то, что максимальные значения деформаций ползучести в этом узле уступают по величине аналогичным значениям в зоне 3, характер их изменения в глубину узла позволяет предположить, что при увеличении времени выдержки либо при отклонении расчетных характеристик материала от исходных именно в этом узле может произойти разрушение.

**Ключевые слова:** экспериментальные и методические средства, моделирование, деформирование, разрушение, жаропрочный сплав ВЖ-159, квазистатические термосиловые нагружения, одноосное деформирование, высокотемпературная ползучесть, упруговязкопластическое поведение элемента конструкции.

#### *Литература*

1. Капустин, С.А. Метод конечных элементов в задачах механики деформируемых тел: Учеб. пособие / С.А. Капустин. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. – 180 с.
2. Вычислительный комплекс УПАКС. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 147 от 31.10.2002.

[10.09.2008]

#### **EXPERIMENTAL-THEORETICAL STUDY OF THE BEHAVIOR OF STRUCTURAL PARTS OF HEAT-RESISTANT ALLOY UNDER HIGH-TEMPERATURE CREEP**

**S.A. Kapustin, D.A. Kazakov, Yu.A. Churilov, A.I. Galushchenko, A.M. Vakhterov**

A complex of experimental and methodological means used for modeling the processes of deformation and failure of structural parts made of heat-resistant alloy ВЖ-159 (developed by FSUE "VIAM"), is discussed. Models describing the behavior of such materials under the conditions of quasi-static thermal-force loading are introduced. The problems of constructing material functions of the above models are examined, and their verification is done using the examples of recovering the uniaxial deformation and creep curves for various temperatures. The problems of numerically modeling the elasto-visco-plastic behavior of a fragment of a structure under the effect of temperatures varying in a preset sequence, distributed loads, and long-term loading are presented.

**Key words:** experimental and methodological means, modeling, deformation, failure, heat-resistant alloy ВЖ-159, quasistatic thermal-force loading, uniaxial deformation, high-temperature creep, elasto-visco-plastic behavior of a fragment of a structure.