

УДК 539.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МНОГОЦИКЛОВЫХ
НАГРУЖЕНИЙ***

© 2014 г. **А.А. Антипов¹, А.Н. Горохов², В.А. Горохов²,
Д.А. Казаков², С.А. Капустин²**

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

*²НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
vas-gor@rambler.ru*

Поступила в редакцию 20.12.2013

Представлены результаты экспериментального исследования многоциклового усталости сплава ВЖ-159 в условиях высокой температуры. Предложен вариант модели накопления повреждений, учитывающий основные факторы, влияющие на многоцикловую прочность конструкционных материалов. Приведены результаты численного моделирования разрушения экспериментального образца и фрагмента сильфона, подтверждающие работоспособность предложенной модели и созданных на ее основе программных средств для анализа процессов многоциклового разрушения элементов конструкций.

Ключевые слова: многоцикловая усталость, накопление повреждений, разрушение, прочность, эксперимент, численное моделирование.

Введение

Многоцикловая усталость (в дальнейшем МНЦУ) является одним из доминирующих деградационных процессов в материалах конструкций, работающих в условиях нестационарного термосилового нагружения. В связи с этим прогнозирование поведения конструкций в условиях МНЦУ представляет собой актуальную задачу, успешное решение которой требует проведения целого комплекса экспериментально-теоретических исследований, связанных с экспериментальным изучением особенностей поведения материала в условиях МНЦУ, созданием соответствующих математических моделей, а также численных схем и алгоритмов, позволяющих моделировать поведение реальных конструкций. В настоящей статье обсуждаются некоторые результаты таких исследований, посвященных моделированию процессов МНЦУ элементов конструкций из жаропрочного сплава в условиях высокотемпературного многоциклового нагружения.

* Выполнено при поддержке РФФИ (грант № 14-08-31084-мол_а) и Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-593.2014.8).

1. Экспериментальное изучение жаропрочного сплава в условиях высокотемпературного многоциклового нагружения

Экспериментальные исследования МНЦУ материалов в области температур, достигающих 1000 °С, в первую очередь связаны с созданием надежного испытательного оборудования, позволяющего реализовывать знакопеременное циклическое нагружение в заданном диапазоне долговечностей.

Испытательное оборудование для получения данных по циклической усталости на лабораторных образцах должно в автоматическом режиме обеспечивать заданный закон периодического нагружения, задаваемую частоту и период цикла, поддерживать на заданном уровне с требуемой точностью величины амплитуды напряжений (деформаций) цикла и значения среднего напряжения (деформации) в цикле, разновидности циклов напряжения (деформаций) и соответствующие им значения коэффициентов асимметрии.

Надежность поддержания указанных параметров нагружения зависит от конструктивных особенностей нагружающего устройства, влияющих на напряженно-деформированное состояние системы «машина – образец», к которым в первую очередь относятся: сохранение соосности, осесимметричности конструктивных элементов во времени при циклическом знакопеременном нагружении; достижение возможно более высоких жесткостей конструктивных элементов и их соединений в нагружающем устройстве в продольном и поперечном направлениях, защита элементов измерительных каналов (преобразователь силы) от возникающих боковых сил и моментов.

Оборудование должно быть снабжено нагревательным устройством с автоматическим поддержанием заданной температуры на рабочей части образца.

Оборудование должно обеспечивать стабильную работу измерительно-управляющего комплекса на протяжении десятков часов с сохранением большого объема экспериментальной информации, получаемой из конкретного опыта.

Испытательная установка Amsler 150HFP5100, согласно техническим данным, отвечает всем требованиям, предъявляемым к испытательным машинам указанного класса, она доукомплектована нагревательным устройством, позволяющим поддерживать в рабочей зоне образца (контроль по трем термопарам) температуру до 1000 °С, системой высокотемпературных захватов для лабораторных образцов выбранной формы.

При рабочей температуре $T = 850$ °С были проведены испытания и получены кривые усталости для материала ВЖ-159 с четырехкратным старением на базе до 10^7 циклов при симметричном (параметр асимметрии $r = -1$) и асимметричных циклах нагружения ($r = -0,7; -0,5$). В цикле нагружения осуществлялся контроль амплитуды σ_a и среднего напряжения σ_{cp} (мягкое нагружение).

Обработка экспериментальной информации позволила получить набор кривых усталостной прочности исследуемого материала при различных уровнях задаваемого среднего напряжения в цикле (разных коэффициентах асимметрии цикла $r = -1; -0,7; -0,5$). Обработанная исходная экспериментальная информация является основой для получения вещественных параметров, входящих в уравнения математической модели поведения материала в условиях МНЦУ.

2. Вариант модели многоциклового усталости конструкционных материалов на основе энергетических критериев разрушения и соотношений механики поврежденной среды

Экспериментальные исследования процессов разрушения материалов в условиях многократного воздействия периодически изменяющейся во времени нагрузки позволяют выделить три характерные области разрушения [1–3].

Первая область характеризуется разрушением, сопровождающимся односторонним накоплением пластических деформаций до величин, близких предельной пластической деформации, при монотонном увеличении нагрузки. Такой вид разрушения называется квазистатическим разрушением.

В пределах второй и третьей областей разрушение представляет собой процесс постепенного накопления повреждений под действием переменных нагрузок, которые способствуют зарождению и развитию дефектов в материале, приводящих к появлению трещины. При этом если в пределах второй области предельное число циклов N_f сравнительно невелико и сопровождается значительными знакопеременными пластическими деформациями (малоцикловое разрушение), то в третьей области разрушение происходит без видимых следов пластической деформации после значительного количества циклов ($N_f > 10^4$) (многоцикловое разрушение).

В области многоциклового усталости уровень действующих напряжений не превышает предела текучести материала, поэтому макроскопические пластические деформации в пределах цикла достаточно малы и ими обычно пренебрегают [2, 4].

Тем не менее, как показывают исследования, при напряжениях, меньших предела текучести, при циклическом деформировании в координатах «напряжение – деформация» наблюдается петля гистерезиса, соответствующая рассеянию энергии и связанная с микропластическими деформациями в локальных объемах материала. При этом в области многоциклового усталости форма петли гистерезиса не играет большой роли, важно лишь значение рассеянной энергии, которая связана с энергией формоизменения за цикл нагружения [2, 5].

В современной литературе, посвященной проблеме многоциклового разрушения материалов, представлено большое количество различных критериальных условий усталостного разрушения [6–9]. В основу энергетических критериев многоциклового усталости положен выбор вида энергии, которая считается ответственной за разрушение материала [2, 10]. В простейших случаях в качестве такой энергии принимается полная энергия упругой деформации за цикл или энергия формоизменения. При таком определении «опасной» энергии ее критическое значение будет зависеть от параметров процесса циклического нагружения (уровня напряжений, параметра асимметрии r). Поэтому в большинстве современных работ предлагается выделить в качестве «опасной энергии», ответственной за разрушение, некоторую долю рассеянной энергии, которая бы в наименьшей степени зависела от параметров циклического нагружения.

Для аналитического описания зависимости суммарной рассеянной энергии от числа циклов предложены различные варианты соотношений [2], связывающие между собой различные доли рассеянной энергии за цикл, непосредственно влияющей на процесс разрушения. Однако эти соотношения, сформулированные для симметричных циклов, не позволяют непосредственно учесть влияние асимметрии цикла, вида напряженно-деформированного состояния (НДС) и ряда других параметров процесса [11–13], что ограничивает возможность их практического исполь-

зования для расчетов МНЦУ конструкций.

В настоящей статье в качестве критериальных условий предлагается использовать достаточно универсальное соотношение

$$F(D, N_f) = C = \text{const.} \quad (1)$$

Конкретный вид этой зависимости может быть получен на основе некоторых предположений о характере экспериментальной зависимости напряжений σ от числа циклов N_f и зависимости энергии формоизменения D за цикл от амплитудного значения напряжений σ .

В частности, если на экспериментальной кривой многоциклового усталости можно выделить участок линейной зависимости между напряжением σ и десятичным логарифмом предельного числа циклов N_f

$$\sigma = -a \lg N_f + b, \quad (2)$$

то соотношению (1) можно придать вид

$$N_f \cdot 10^{\sigma/a} = 10^{b/a}. \quad (3)$$

Полагая далее, что энергия упругого формоизменения за цикл нагружения $D \sim \sigma^2$, и введя константы k и C , можно получить вариант определяющего соотношения для модели многоциклового усталости в виде

$$N_f \cdot 10^{k\sqrt{D}} = C. \quad (4)$$

Константу k в (4) можно определить по двум точкам на экспериментальной кривой многоциклового усталости из следующего соотношения:

$$k = \frac{\lg(N_{f2}/N_{f1})}{\sqrt{D_1} - \sqrt{D_2}}. \quad (5)$$

Поскольку величины k и C определяются на основе кривой многоциклового усталости, полученной при фиксированных значениях температуры T , параметра асимметрии цикла r и параметра вида НДС П, в общем случае многоциклового нагружения названные величины должны являться функциями этих параметров: $k = k(T, r, П)$, $C = C(T, r, П)$.

Приведенные соотношения позволяют получить выражение для изменения функции поврежденности $\Delta\Psi$ за один цикл (в пределах одноблочной схемы нагружения) при фиксированных параметрах цикла. При этом суммарная энергия формоизменения W_R , затрачиваемая на разрушение материала в данной точке материала, и изменение функции поврежденности $\Delta\Psi$ за цикл могут быть записаны в виде

$$W_R = \sum_{i=1}^{N_f} D = D \cdot N_f, \quad (6)$$

$$\Delta\Psi = \frac{D}{W_R} = \frac{1}{N_f} = \frac{10^{k\sqrt{D}}}{C},$$

где D – изменение энергии формоизменения за цикл, N_f – число циклов до разрушения при фиксированных значениях параметров цикла T , r и П.

При построении адекватной модели многоциклового усталости, наряду с полученными соотношениями для определения опасной энергии D за цикл нагружения,

должны быть сформулированы кинетические уравнения накопления повреждений и влияния текущей поврежденности на характеристики процесса деформирования [10, 14, 15].

Для описания развития повреждений в материале при многоцикловом нагружении вводится функция повреждений ψ , представляющая собой нормированный аналог опасной энергии, и скалярная мера поврежденности ω , используемая для описания влияния текущей поврежденности на характеристики процесса деформирования на основе гипотезы о наличии двух фаз накопления повреждений [1, 3, 16].

В пределах первой фазы происходит зарождение рассеянных по объему материала повреждений в виде микропор и микротрещин, не приводящее к заметному влиянию этих повреждений на физико-механические характеристики материала. Применительно к рассмотренной выше модели поврежденного материала для этой фазы можно считать изменение меры поврежденности $\Delta\omega = 0$.

Вторая фаза характеризуется дальнейшим развитием и взаимодействием возникающих дефектов и сопровождается нарастающим влиянием повреждений на физико-механические характеристики материала и дестабилизацию процесса циклического деформирования при циклических нагружениях. Конец фазы соответствует появлению в материале макроскопической трещины.

Учет наличия названных фаз при описании накопления повреждений может быть осуществлен путем введения переменной, определяющей завершение первой фазы [3, 16]. В качестве такой переменной в настоящем исследовании используется величина ψ_a ($\psi_a = \psi_a(\sigma_a)$, где амплитуда напряжений цикла $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$), соответствующая значению упомянутой выше функции поврежденности к концу первой фазы. При этом зависимость изменения меры поврежденности $\Delta\omega$ от изменения функции поврежденности за цикл нагружения $\Delta\psi$ принимается в виде [16]:

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= p\bar{\omega}^{-(p-1)/p} \Delta\psi^0, \\ \Delta\psi^0 &= \frac{\Delta\psi}{1 - \psi_a} \text{ при } \psi > \psi_a, \\ \Delta\psi^0 &= 0 \text{ при } \psi \leq \psi_a, \end{aligned} \quad (7)$$

где p – функция материала.

В пределах второй фазы вычисления действующих напряжений и деформаций конструкции необходимо осуществлять в рамках соотношений механики поврежденной среды, т.е. с учетом влияния текущей меры поврежденности на характеристики процесса деформирования.

Реализация предложенной модели, кроме набора материальных функций, определяющих характеристики упругости материала, требует наличия дополнительного набора функций для модели многоциклового усталости. Полный перечень таких функций и зависимость этих функций от параметров процесса циклического деформирования включает в себя $k(r, T, \Pi)$, $C(r, T, \Pi)$, $\psi_a(\sigma_a, T, r)$, $p(T)$.

Ввиду того, что получить полный набор необходимых кривых многоциклового усталости при различных значениях параметров r , T , Π практически невозможно, для приближенных оценок могут быть использованы имеющиеся эмпирические зависимости многоциклового усталости от перечисленных выше параметров. В частности, в [11] предложено несколько вариантов учета влияния отличного от нуля среднего напряжения цикла на долговечность материала при многоцикловом на-

грузении (линейная зависимость Смита, параболическая зависимость Гербера и др.). В [12, 13] также можно найти зависимости влияния вида НДС на характеристики долговечности материалов при многоцикловом нагружении.

Исследование поведения конструкций на основе предложенных выше соотношений осуществляется в рамках общей схемы решения нелинейных задач деформирования и разрушения конструкций, реализованной в вычислительном комплексе УПАКС [17], с учетом специфики задач, определяемой циклическим характером изменения внешних воздействий.

В частности, наряду с дискретизацией процесса нагружения конструкций в виде последовательности этапов нагружения (участков с линейным изменением внешних воздействий), при исследовании циклических нагружений вводятся понятия «цикла», содержащего типовой набор повторяющихся этапов, и «блока» нагружения, объединяющего определенный набор одинаковых циклов.

В общей схеме ВК УПАКС на каждом этапе нагружения решается нелинейная краевая задача для соответствующего изменения внешних воздействий с учетом всей предшествующей истории необратимого деформирования и накопленной поврежденности материала. Непосредственное применение такой схемы для исследования поведения конструкций при циклических нагружениях (путем последовательного интегрирования уравнений для большого числа циклов) представляется весьма затруднительным из-за большой трудоемкости вычислений и возможности накопления численной погрешности. В связи с этим для исследования многоцикловых нагружений предложен алгоритм многоступенчатого прогнозирования процессов зарождения и развития усталостных повреждений в материале конструкций на основе численного моделирования этих процессов в рамках соотношений механики поврежденной среды.

В основу алгоритма положена возможность экстраполяции по циклам нагружения параметров, характеризующих НДС и поврежденность материала в узлах конструкции, на заданное число циклов.

На первом уровне прогнозирования по результатам решения задачи для первого цикла осуществляется экстраполяция функции поврежденности Ψ до значения, соответствующего моменту завершения первой фазы накопления повреждений в наиболее нагруженной точке конструкции.

На последующих уровнях производится экстраполяция параметров, характеризующих меру поврежденности ω в точках материала, на число циклов, определяемое заданным изменением меры $\Delta\omega$ в наиболее нагруженном узле, и последующая их коррекция за счет уточнения равновесного состояния конструкции.

3. Численное моделирование многоциклового усталости элементов конструкций

Для иллюстрации применения и оценки работоспособности предложенных моделей, алгоритмов и созданной на их основе программы проведено численное решение ряда задач по исследованию процессов деформирования и разрушения в результате многоциклового усталости элементов конструкций, выполненных из сплава ВЖ-159, при постоянной температуре $T = 850^\circ\text{C}$ и различных законах изменения в цикле внешних воздействий.

В первой задаче рассмотрены процессы усталостного разрушения осесимметричного образца, который использовался для экспериментального изучения много-

цикловой усталости сплава ВЖ-159. Образец находился в условиях растяжения-сжатия осевыми силами, интенсивность которых меняется в цикле от минимальных q_i^{\min} до максимальных q_i^{\max} значений. Схема конечно-элементной дискретизации фрагмента образца изображена на рис. 1.

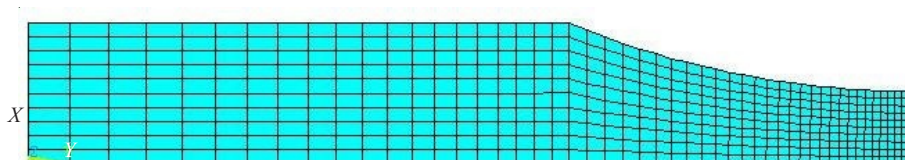


Рис. 1

Рассмотренные варианты нагрузок, соответствующие различным значениям амплитуд напряжений и параметров асимметрии цикла в рабочей части образца, приведены в таблице 1.

Таблица 1

r_j	$q_i, \text{кг/мм}^2$			
		$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
$r_1 = -1$	q^{\max}	8,282	7,639	6,996
	q^{\min}	-8,282	-7,639	-6,996
$r_2 = -0,7$	q^{\max}	9,182	8,590	7,973
	q^{\min}	-6,430	-6,018	-5,581
$r_2 = -0,5$	q^{\max}	10,082	9,439	8,779
	q^{\min}	-5,041	-4,720	-4,385

На рис. 2 показана картина распределения интенсивности напряжений (в кг/мм^2) в продольном сечении фрагмента образца, построенная для варианта нагрузки $r_1 = -1$, $q^{\max} = 7,639 \text{ кг/мм}^2$ в конце первого полуцикла.

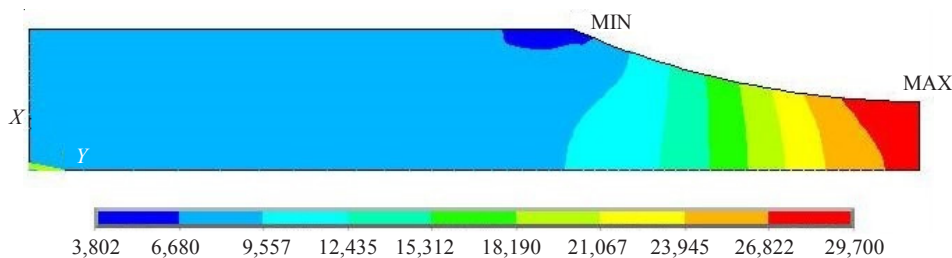


Рис. 2

Для этого же варианта нагрузки на рис. 3 показана картина прогнозируемого распределения функции поврежденности в продольном сечении фрагмента образца к моменту разрушения материала в наиболее нагруженной его точке, соответствующему числу циклов $N = N_f = 990694$.

Результаты расчета всех вариантов нагружений и сравнение их с соответствующими результатами эксперимента приведены в таблице 2, а также в графическом виде на рис. 4.

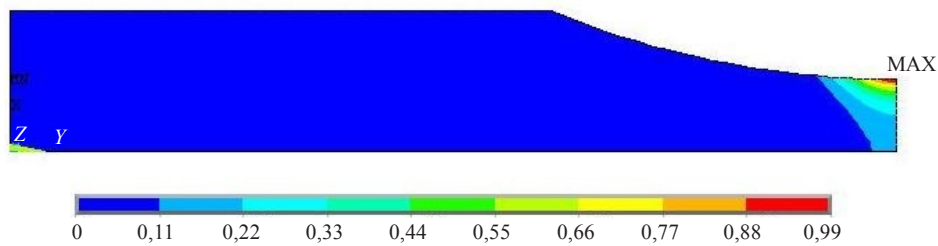


Рис. 3

Таблица 2

r_j	N_f циклов			
		$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
$r_1 = -1$	Эксперимент	100000	1000000	10000000
	Расчет	99077	990694	9908417
$r_1 = -0,7$	Эксперимент	100000	1000000	10000000
	Расчет	99541	947691	9910801
$r_1 = -0,5$	Эксперимент	100000	1000000	10000000
	Расчет	99096	954981	10100924

Сплошными линиями на рис. 4 изображены экспериментальные зависимости предельного числа циклов N_f от амплитуд напряжений σ_a при различных значениях параметра асимметрии r , результаты численного решения – точками.

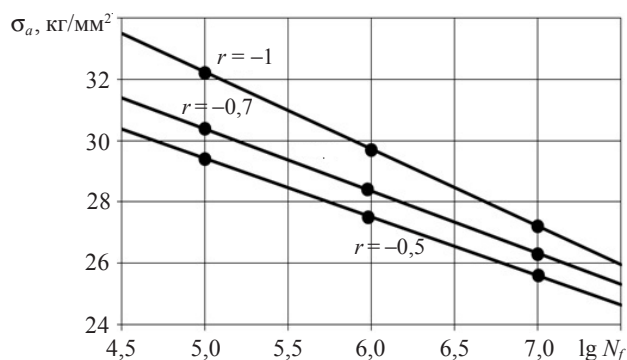


Рис. 4

Приведенные материалы показывают хорошее согласование результатов численных решений с экспериментальными данными (максимальная разница в прогнозе N_f составляет $\delta \approx 5\%$), что позволяет судить о высокой эффективности предложенной методики и работоспособности созданных программных средств.

Для демонстрации возможности использования разработанных методических и программных средств при исследовании многоциклового разрушения реальных конструкций представлены результаты численного моделирования процесса накопления усталостных повреждений во фрагменте сильфона. Осевое сечение фрагмента и условий нагружения (геометрические размеры указаны в мм), а также схема конечно-элементной дискретизации представлены на рис. 5. В связи с наличием в геометрии фрагмента оси симметрии рассматривалась 1/16 часть фрагмента по окружности ($22,5^\circ$).

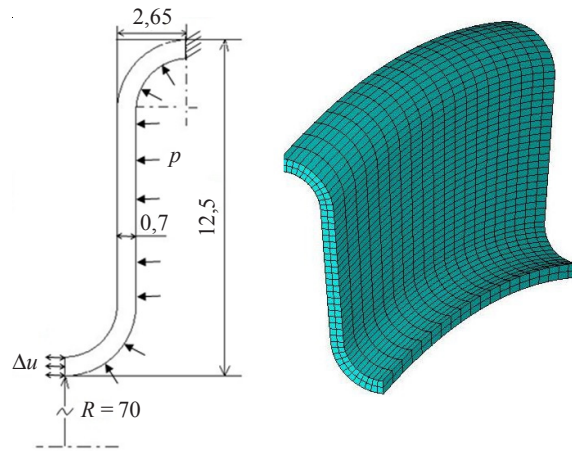


Рис. 5

Рассмотрен следующий вариант циклического нагружения:

- приложение внутреннего давления величиной $p = 0,05 \text{ кг/мм}^2$ при неизменном положении левого торца ($\Delta u = 0$) (этап 1);
- смещение левого торца на величину $\Delta u = 0,6 \text{ мм}$ (при постоянном давлении $p = 0,05 \text{ кг/мм}^2$) (этап 2);
- смещение левого торца на величину $\Delta u = -0,6 \text{ мм}$ (при постоянном давлении $p = 0,05 \text{ кг/мм}^2$) (этап 3);
- возвращение левого торца в исходное состояние $\Delta u = 0$ (при постоянном давлении $p = 0,05 \text{ кг/мм}^2$) (этап 4).

Таким образом, цикл нагружения состоит из этапов нагружения 2, 3 и 4.

В результате решения задачи установлено, что прогнозируемое число циклов до разрушения $N_f = 894324$. Распределения интенсивности напряжений (в кг/мм^2), соответствующие первому и второму этапам нагружения, представлены на рис. 6 и рис. 7 соответственно.

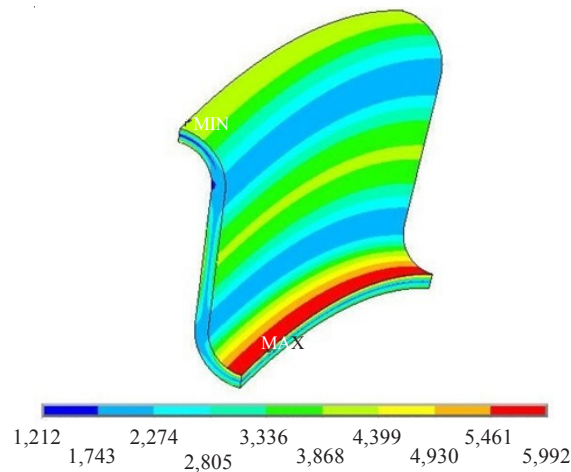


Рис. 6

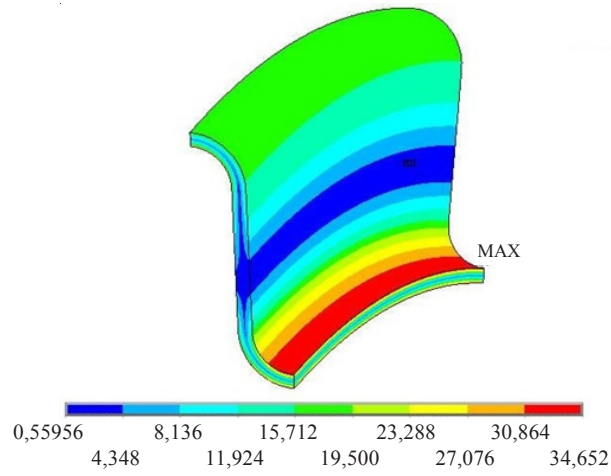


Рис. 7

Распределение интенсивности напряжений, соответствующее третьему этапу нагружения (виды со стороны наружной и внутренней поверхностей), представлено на рис. 8 и рис. 9.

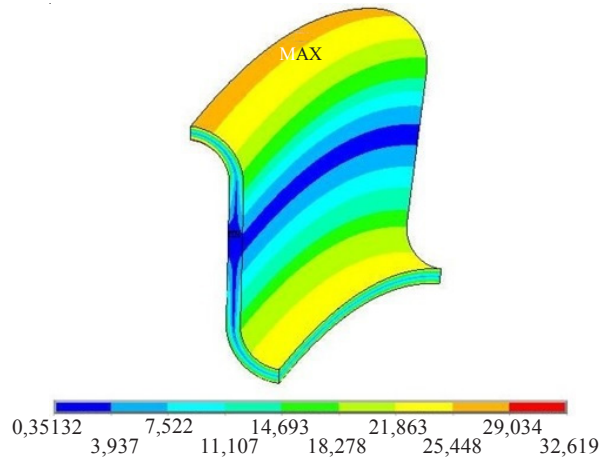


Рис. 8

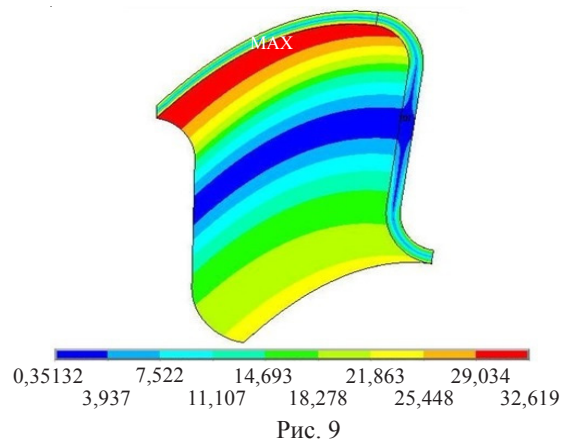


Рис. 9

Картини распределения значений параметра поврежденности (виды со стороны наружной и внутренней поверхностей), соответствующие полученному числу циклов до разрушения, приведены на рис. 10 и рис. 11.

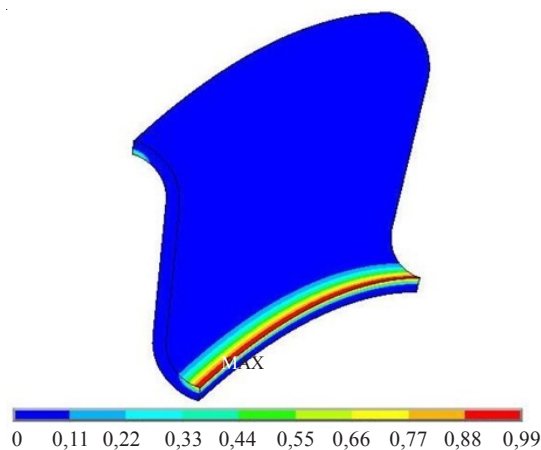


Рис. 10

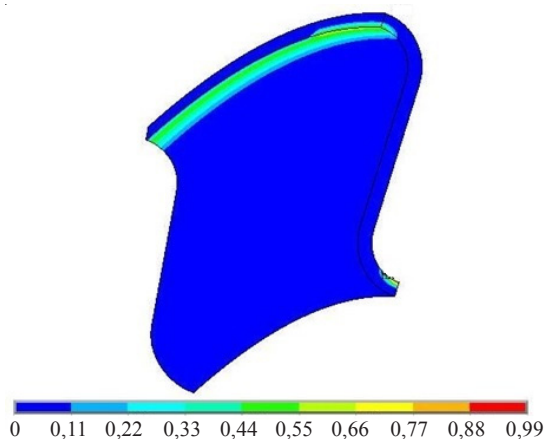


Рис. 11

Заключение

Получены кривые многоциклового усталости сплава ВЖ-159 при температуре $T = 850^\circ\text{C}$ для различных значений параметра асимметрии цикла ($r = -1; -0,7; -0,5$).

Предложена модель многоциклового усталости, учитывающая зависимость числа циклов до разрушения от:

- уровня действующей температуры;
- параметра асимметрии цикла;
- реализуемого в цикле вида НДС;
- накопленной поврежденности.

В рамках ВК УПАКС [17] созданы программные средства моделирования многоциклового усталости конструкций.

Результаты расчетов усталостного разрушения экспериментального образца и

фрагмента сильфона подтверждают, что созданные программные средства, реализующие предложенную модель и численную методику, позволяют проводить исследования процессов деформирования и разрушения конструкций в условиях многоцикловых нагружений на основе прямого численного моделирования.

Список литературы

1. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, С.Н. Пичков / Под общ. ред. Ф.М. Митенкова. М.: Машиностроение, 2007. 448 с.
2. Троценко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. Киев: Наукова думка, 1981. 344 с.
3. Капустин С.А., Горохов В.А., Чурилов Ю.А. Алгоритмы прогнозирования малоцикловой прочности конструкций на основе МКЭ // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2011. Вып. 73. С. 13–24.
4. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. М: Наука, 1988. 282 с.
5. Голос, Эльин. Теория накопления усталостных повреждений, основанная на критерии удельной энергии полной деформации // Современное машиностроение. Сер. Б. 1989. №1. С. 64–71.
6. Ying-Yu Wang, Wei-Xing Yao. Evaluation and comparison of several multiaxial fatigue criteria // International Journal of Fatigue. 2004. V. 26. P. 17–25.
7. Vu Q.H., Halm D., Nadot Y. Multiaxial fatigue criterion for complex loading based on stress invariants // International Journal of Fatigue. 2010. V. 32. P. 1004–1014.
8. Yongming Liu, Sankaran Mahadevan. Multiaxial high-cycle fatigue criterion and life prediction for metals // International Journal of Fatigue. 2005. V. 27. P. 790–800.
9. Jan Papuga, Milan Ruzicka. Two new multiaxial criteria for high cycle fatigue computation // International Journal of Fatigue. 2008. V. 30. P. 58–66.
10. Модель поврежденной среды для оценки долговечности конструкций при совместном действии механизмов мало- и многоциклового усталости / И.А. Волков, М.Н. Ереев, Ю.Г. Коротких, И.С. Тарасов // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5, №1. С. 54–60.
11. Коллинз Д.Ж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 624 с.
12. Павлов П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность. Л.: Машиностроение, 1988. 252 с.
13. Numerical evaluation of fatigue strength on mechanical notched components under multiaxial loadings / S. Capetta, R. Tovo, D. Taylor, P. Livieri // International Journal of Fatigue. 2011. V. 33. P. 661–671.
14. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. 226 с.
15. Королев И.К., Петинов С.В., Фрейдин А.Б. Численное моделирование накопления повреждений и развития усталостной трещины в упругих материалах // Вычислительная механика сплошных сред. 2009. Т. 2, №3. С. 34–43.
16. Капустин С.А. Метод конечных элементов в задачах механики деформируемых тел: Учеб. пособие. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2002. 150 с.
17. Вычислительный комплекс УПАКС. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 147 от 31.10.2002.

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES FATIGUE OF MATERIALS
AND STRUCTURES UNDER HIGH-TEMPERATURE AND HIGH-CYCLE LOADING**

A.A. Antipov, A.N. Gorokhov, V.A. Gorokhov, D.A. Kazakov, S.A. Kapustin

The experimental research of high-cycle fatigue alloy VJ-159 under high-temperature loading are presented. A variant of the damage accumulation model suggested, taking into account the main factors affecting the high-cycle strength of structural materials. The results of numerical simulation the experimental sample and the bellows fragment fracture, confirming the efficiency of the proposed model and created on its basis software tools for the analysis high-cycle processes fracture construction elements.

Keywords: high-cycle fatigue, damage accumulation, fracture, strength, experiment, numerical simulation.