

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-3-294-310

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ
ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ
ПРИ ОДНООСНОМ РАСТЯЖЕНИИ***

© 2021 г.

Сметанин И.В.

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

ilia.smetanin2@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.05.2021

Рассматриваются основные закономерности процессов деформирования и деградации начальных прочностных свойств конструкционных материалов (металлов и их сплавов) по механизму длительной прочности. Для описания процессов высокотемпературной ползучести и длительной прочности поликристаллических конструкционных сплавов используется подход, основанный на концепции «скрытых» или «внутренних» параметров, который может дать качественное и количественное описание экспериментальных данных. Такой подход обладает двумя важными преимуществами: позволяет охватить широкий диапазон поведения конструкционных материалов и в то же время он очень удобен для анализа напряженно-деформированного состояния. Используемая в работе математическая модель механики поврежденной среды, описывающая процесс неупругого деформирования и накопления повреждений при ползучести, состоит из трех взаимосвязанных составных частей: эволюционных соотношений, определяющих неупругое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения; кинетических уравнений, описывающих процесс накопления повреждений; критерия прочности поврежденного материала.

Вариант определяющих соотношений вязкопластического деформирования поликристаллических конструкционных сплавов основан на представлении о существовании в пространстве напряжений семейства эквипотенциальных поверхностей ползучести и принципе градиентальности вектора скорости деформации ползучести к соответствующей поверхности в точке нагружения. Такой вариант уравнений состояния отражает основные закономерности процесса вязкопластического деформирования материала при пропорциональных и непропорциональных режимах комбинированного термомеханического нагружения.

Вариант кинетических уравнений накопления повреждений основан на введении скалярного параметра поврежденности, базируется на энергетических принципах и учитывает основные эффекты образования, роста и слияния микродефектов для произвольных сложных режимов термомеханического нагруже-

* Выполнено при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования РФ (проект 0729-2020-0054).

ния. В качестве критерия прочности поврежденного материала используется условие достижения величиной поврежденности критического значения.

Приводятся результаты экспериментальных исследований кратковременной высокотемпературной ползучести ряда конструкционных сплавов (медь, нержавеющая сталь X18H10T) при постоянных значениях температуры и различных уровнях задаваемых в образцах усилий.

Для оценки степени достоверности и определения границ применимости модели механики поврежденной среды проведены численные исследования процесса высокотемпературной ползучести и длительной прочности данных конструкционных сплавов и выполнено сравнение полученных численных результатов с данными натурных экспериментов. Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных позволяют сделать вывод о достоверности предложенных определяющих соотношений при деградации начальных прочностных свойств конструкционных материалов по механизму длительной прочности. Показано, что используемая модель качественно и с необходимой для практических расчетов точностью количественно описывает основные эффекты процесса вязкопластического деформирования и накопления повреждений в поликристаллических конструкционных сплавах при высокотемпературном термомеханическом нагружении.

Ключевые слова: нестационарная ползучесть, длительная прочность, моделирование, определяющие соотношения, механика поврежденной среды, температура, поврежденность, материальные параметры, численный и натуральный эксперимент.

Введение

В течение срока службы материал конструктивных элементов оборудования и систем ответственных инженерных объектов (ОИО), срок службы которых составляет несколько десятков лет (атомные энергетические установки, нефтехимическое оборудование, резервуары для хранения газообразных и сжиженных химических продуктов, авиационные газотурбинные двигатели (ГТД) и установки (ГТУ) нового поколения и др.), работающие в условиях нестационарного термомеханического нагружения, накапливает повреждения, приводящие к ухудшению начальных прочностных характеристик, образованию и развитию трещин. Длительное время эти изменения происходят скрытно. Кроме того, наиболее опасные зоны, определяющие ресурс конструктивного элемента, как правило, недоступны для средств неразрушающего контроля. Для гарантированной безопасной эксплуатации ОИО и обоснованного продления их службы сверх нормативных сроков необходимо контролировать темпы развития поврежденности в наиболее опасных зонах конструктивных элементов (выработанный ресурс), а также прогнозировать развитие этих процессов до предельных состояний (остаточный ресурс) [1–4].

Ресурс важнейших элементов конструкций, работающих в условиях переменных температур, достигающих $(0,4–0,5)T_{пл}$ ($T_{пл}$ – температура плавления) и выше, определяется процессом накопления повреждений, вызванных процессом ползучести материала, протекающим на фоне знакопеременных нагружений. Долговечность материала в этих условиях определяется малоцикловой усталостью, длительной прочностью и их взаимодействием. Необходимость надежной работы конструктивных элементов в течение десятков лет порождает необходимость исследования длительной прочности материалов на базе $10^5–10^6$ часов и выше, разработки теоретических методов и расчетных методик оценки выработанного и остаточного ресурса.

Для решения этих проблем необходимо экспериментально-теоретическое исследование высокотемпературной нестационарной ползучести на всех ее стадиях и процессов накопления повреждений в материале опасных зон конструкций с интенсивной ползучестью. Наиболее распространенным методом исследования ползучести и длительной прочности конструкционных материалов является построение экспериментальной кривой «растягивающее напряжение ~ время до разрушения» в экспериментах по одноосному растяжению образцов при постоянной температуре [5, 6]. На кривых ползучести имеются три характерных участка. При исследовании характеристик процесса накопления повреждений наибольший интерес представляют время начала третьего участка, скорость ползучести на установившемся участке, закон изменения скорости ползучести на третьем участке, время до разрушения и деформация ползучести к моменту разрушения. Наличие третьего неустановившегося участка на кривой ползучести вызвано влиянием накопленной поврежденности на деформационные характеристики материала (скорость ползучести), а закон изменения скорости ползучести на этом участке определяется скоростью накопления повреждения в материале на этом участке. Начало третьего участка есть граница начала влияния накопленной поврежденности на деформационные характеристики материала.

Три стадии деформации ползучести являются проявлением на макроуровне последовательных изменений начальных прочностных свойств в материале. После продолжительного начального периода с преобладанием вязкого деформирования характерное для третьей стадии быстрое увеличение скорости деформации является прямым следствием ускоренного роста микродефектов с последующим их слиянием, приводящим к разрушению при ползучести. Применительно к конструкционным материалам очень важен вопрос о взаимосвязи процессов деформирования и разрушения, поскольку наличие такой взаимосвязи дает возможность искать пути оценки поврежденности материала при ползучести по деформационным характеристикам материала. Экспериментальные исследования показали наличие четко выраженной связи кинетических процессов деформирования и накопления повреждений при ползучести: существует линейная связь между деформацией ползучести на всех стадиях и объемной долей микродефектов. На третьей стадии наблюдается прямо пропорциональная зависимость между приростом объемной доли микропор и увеличением скорости ползучести [7, 8]. Разделить процессы зарождения и роста несплошностей и деформирования на ведущий процесс и ведомый не представляется возможным. Эти процессы взаимосвязаны и влияют друг на друга.

Следовательно, экспериментальное исследование процесса ползучести на третьем участке кривой имеет существенное значение для исследования закономерностей процесса накопления повреждений, хотя в реальных процессах деформирования материала с выдержками различной длительности разрушение (образование макротрещины) вследствие накопления повреждений происходит на малых деформациях ползучести, но больших ее траекториях. Поскольку для реальных условий эксплуатации конструкционных материалов начало установившегося участка достигается за несколько десятков часов, а общее время до разрушения составляет от нескольких сотен до тысяч часов, возникает проблема проведения испытаний на достаточно большой временной базе. Для ее решения необходимо установить соответствие между испытаниями на кратковременную ползучесть при повышенных температурах и характеристиками ползучести и длительной прочности для большой временной

базы при более умеренных температурах. Существует несколько различных зависимостей, устанавливающих это соответствие [9–11].

Большинство исследований конструкционных материалов на ползучесть и длительную прочность проведено при испытаниях на растяжение цилиндрических образцов при постоянных напряжениях и температурах. Однако реальные задачи ползучести и длительной прочности элементов конструкций связаны с гораздо более сложными условиями нагружения, например переменными напряжениями, с изменением вида напряженного состояния и циклически меняющимися температурами. Поскольку ползучесть металлов и длительная прочность весьма чувствительны к изменению напряженного состояния и температуры, которая влияет на все их параметры, возникает проблема исследования закономерностей неизотермической ползучести и длительной прочности при различных видах напряженных состояний и разработки методов оценки ползучести и длительной прочности конструктивных элементов в условиях многоосного напряженного состояния на основании экспериментальных данных, полученных в результате испытаний при одноосном напряженном состоянии. Результаты многочисленных исследований, в которых различные металлы испытывались на длительную прочность при различных температурах в условиях одноосного растяжения, чистого кручения и совместного кручения и растяжения, привели к выводу, что в условиях однородного напряженного состояния из всех возможных эквивалентных напряжений подходящим для определения длительной прочности и сопоставления кривых ползучести при различных видах напряженных состояний является либо максимальное главное напряжение, либо интенсивность напряжений (второй инвариант девиатора напряжений), либо их комбинация [6]. Существуют публикации, в которых экспериментально обосновывается гипотеза эквивалентности интенсивности процесса ползучести (и длительной прочности) на базе предположения наличия единой кривой удельной работы рассеяния энергии. Под интенсивностью процесса ползучести понимается диссипируемая мощность [12]. Для выбора конкретного вида эквивалентного напряжения для данного конструкционного материала необходимо проведение дополнительных экспериментов на ползучесть и длительную прочность при кручении или эксперимента на совместное кручение и растяжение трубчатого образца.

Кривые долговечности, как правило, строятся для постоянных напряжений (нагрузок), в то время как в практических условиях напряжения и температуры меняются по довольно сложным законам. Вследствие этого возникает проблема суммирования повреждений для весьма нерегулярных историй нагружения. При оценке времени разрушения в условиях переменных напряжений и температур важным является возможность проведения расчетов по результатам испытаний при постоянных напряжениях и температурах. В технических приложениях для этих целей используют правило линейного суммирования повреждений, в котором принимается, что каждая часть использованной долговечности или накопленное повреждение независимы друг от друга. Разрушение происходит тогда, когда сумма частей долговечности равна единице. Этот закон широко используется в инженерных расчетах для случаев работы конструкций в условиях переменных температур и переменных нагружений. Сравнение с линейным законом суммирования относительных долговечностей приводит к следующим выводам [13]:

– накопление повреждений при ползучести в испытуемом сплаве в общем случае не является линейной функцией времени предварительного воздействия;

– довольно сложно сравнить состояние повреждений для одинаковых по времени частей долговечности, так как отдельное влияние каждого из факторов (температуры или напряжения) на процесс зарождения и роста пор не изучено. Однако установлено, что для каждой заданной части долговечности суммарный объем пор возрастает с уменьшением напряжения (при постоянной температуре) и с уменьшением температуры (при постоянном напряжении). Для одного и того же воздействия в течение части долговечности степень размягчения (объем пор) возрастает с уменьшением напряжения, но почти не чувствительна к температуре;

– не существует какого-либо единого значения повреждения при ползучести, при котором разрушение наступает всегда; каждая совокупность испытаний или условий эксплуатации дает свое характерное значение повреждения при разрушении.

Повреждение и разрушение материалов в основном обусловлено зарождением микродефектов, их ростом и слиянием в макроскопические трещины. Распределенные дефекты в материалах не только приводят к возникновению трещин и окончательному разрушению (расчленению объекта на части), но также и вызывают ухудшение физико-механических характеристик материала («деградация» начальных прочностных свойств материала), в том числе уменьшение прочности, жесткости, устойчивости и остаточного ресурса.

Надежное прогнозирование ресурса конструктивных узлов объекта на стадии проектирования, оценка выработанного и прогноз остаточного ресурса на стадии эксплуатации невозможны без разработки достоверных математических моделей доминирующих процессов развития поврежденности для индивидуальных условий эксплуатации конкретных объектов. На стадиях накопления рассеянных повреждений в конструкционном материале такие модели разрабатываются в рамках механики поврежденной среды, объединяющей эволюционные уравнения процессов деформирования материала и процессов накопления повреждений и содержащей интегральные параметры состояния, отражающие процессы преобразования структуры материала на мезоуровне [1–4, 14–20].

В настоящей статье для описания процессов высокотемпературной ползучести и длительной прочности конструкционных материалов (металлов и их сплавов) используется математическая модель механики поврежденной среды (МПС), описывающая процессы неупругого деформирования и накопления повреждений при ползучести [1–4]. Проведены численные исследования процессов длительной прочности ряда конструкционных сплавов и выполнено сравнение полученных численных результатов с данными натурных экспериментов.

1. Определяющие соотношения механики поврежденной среды

Основные положения рассматриваемого варианта МПС, основные идеи которого заложены проф. Ю.Г. Коротких и развиты его учениками (И.А. Волковым, Д.А. Казаковым, Д.Н. Шишулиным), заключаются в следующем [1–4]:

– материал среды начально изотропен и повреждения в нем отсутствуют (учитывается только анизотропия, вызванная процессами деформирования; анизотропия упругих свойств, вызванная процессами поврежденности материала, не учитывается);

– компоненты тензоров деформаций e_{ij} и скоростей деформаций \dot{e}_{ij} представляют собой сумму «мгновенной» и «временной» составляющей. «Мгновенная» составляющая состоит из упругих компонент e_{ij}^e, \dot{e}_{ij}^e , не зависящих от истории деформирования и определяющих конечное состояние процесса, и пластических ком-

понент $e_{ij}^p, e_{ij}'^p$, зависящих от истории процесса деформирования. «Временная» составляющая (деформаций ползучести $e_{ij}^c, e_{ij}'^c$) описывает временную зависимость процессов деформирования при низких скоростях нагружения;

– в пространстве напряжений существует семейство эквипотенциальных поверхностей ползучести с радиусом C_c и координатами общего центра ρ_{ij}^c , вектор скорости деформации ползучести к которым направлен по нормали;

– изменение объема элемента тела упруго, то есть $e_{ii}^p = e_{ii}^c = 0$;

– рассматриваются процессы деформирования, характеризующиеся малыми деформациями;

– единственным структурным параметром, характеризующим на макроуровне степень поврежденности материала, является скалярный параметр ω – поврежденность ($\omega_0 \leq \omega \leq \omega_f$, где ω_0 – начальная поврежденность материала, ω_f – значение величины поврежденности в момент образования макроскопической трещины);

– влияние уровня накопленной поврежденности на процесс деформирования материала учитывается путем введения эффективных напряжений $\tilde{\sigma}_{ij}$.

Модель поврежденной среды состоит из трех взаимосвязанных частей:

– соотношений, определяющих вязкопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения;

– уравнений, описывающих кинетику накопления повреждений;

– критерия прочности поврежденного материала.

Соотношения термползучести

Связь между тензором напряжений и тензором деформаций на базе уравнений термоупругости описывается соотношениями:

$$\begin{aligned} \sigma &= 3K[e - \alpha T], \quad \dot{\sigma} = 3K[\dot{e} - \dot{\alpha}T - \alpha\dot{T}] + \frac{\dot{K}}{K}\sigma, \\ \sigma'_{ij} &= 2Ge'_{ij}, \quad \dot{\sigma}'_{ij} = 2G\dot{e}'_{ij} + \frac{\dot{G}}{G}\sigma'_{ij}, \quad e'_{ij} = e'_{ij} - e_{ij}^c, \end{aligned} \quad (1)$$

где σ, e – шаровые, а σ'_{ij}, e'_{ij} – девиаторные компоненты тензоров напряжений σ_{ij} и деформаций e_{ij} соответственно, $G(T)$ – модуль сдвига, $K(T)$ – объемный модуль упругости, $\alpha(T)$ – коэффициент температурного расширения – функция температуры T .

Для описания процессов ползучести в пространстве напряжений вводится семейство эквипотенциальных поверхностей ползучести F_c , имеющих общий центр ρ_{ij}^c и различные радиусы C_c , определяемые текущим напряженным состоянием [2–5]:

$$F_c^{(i)} = S_{ij}^c S_{ij}^c - C_c^2 = 0, \quad S_{ij}^c = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}^c, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Согласно ассоциированному закону,

$$\dot{e}_{ij}^c = \lambda_c \frac{\partial F_c^{(i)}}{\partial S_{ij}^c} = \lambda_c S_{ij}^c, \quad (3)$$

где λ_c соответствует текущей поверхности $F_c^{(i)}$, определяющей текущее напряженное состояние S_{ij}^c .

Среди этих эквипотенциальных поверхностей можно выделить поверхность с радиусом \bar{C}_c , соответствующую нулевой скорости ползучести:

$$F_c^{(0)} = \bar{S}_{ij}^c \bar{S}_{ij}^c - \bar{C}_c^2 = 0, \quad \bar{S}_{ij}^c = \bar{\sigma}'_{ij} - \rho_{ij}^c, \quad (4)$$

где \bar{S}_{ij}^c и $\bar{\sigma}'_{ij}$ – совокупность напряженных состояний, отвечающих (с определенным допуском) нулевой скорости ползучести.

Постулируем, что

$$\begin{aligned} \bar{C}_c &= \bar{C}_c(\chi_c, T), \quad \dot{\chi}_c = \left(\frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^c, \dot{e}_{ij}^c \right)^{1/2}, \quad \chi_c = \int_0^t \dot{\chi}^c dt, \\ \Psi_c &= \left[\frac{(S_{ij}^c S_{ij}^c)^{1/2} - \bar{C}_c}{C_c} \right], \quad \lambda_c = \begin{cases} 0, & \Psi_c \leq 0, \\ \lambda_c(\Psi_c, T), & \Psi_c > 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

где \bar{C}_c и λ_c – экспериментально определяемые функции температуры T .

Эволюционное уравнение для изменения координат центра поверхности ползучести имеет вид [9]:

$$\dot{\rho}_{ij}^c = g_1^c \dot{e}_{ij}^c - g_2^c \rho_{ij}^c \dot{\chi}_c, \quad (6)$$

где g_1^c и $g_2^c > 0$ – экспериментально определяемые материальные параметры.

Конкретизируя соотношение (3), закон градиентальности можно представить в виде:

$$\dot{e}_{ij}^c = \lambda_c(\Psi_c, T) S_{ij}^c = \lambda_c \Psi_c S_{ij}^c = \lambda_c \left(\frac{\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c}{C_c} \right) S_{ij}^c, \quad (7)$$

тогда выражение для длины траектории деформаций ползучести примет вид [21]:

$$\dot{\chi}_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{e}_u^c = \sqrt{\frac{2}{3}} \lambda_c \left(\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c \right). \quad (8)$$

Из (8) следует, что для трех участков кривой ползучести [5, 6] выражение для λ_c примет вид [21]:

$$\lambda_c = \begin{cases} 0, & \Psi_c \leq C_c \vee \chi_c = 0, \\ \lambda_c^I, & 0 \leq \chi_c \leq \chi_c^{(1)}, \\ \lambda_c^{II}, & \chi_c^{(1)} \leq \chi_c \leq \chi_c^{(2)}, \\ \lambda_c^{III}, & \chi_c^{(2)} \leq \chi_c \leq \chi_c^{(3)}; \end{cases} \quad (9)$$

$$\lambda_c^I = \lambda_c^{(0)} \left(1 - \frac{e_{11}^c}{e_{11}^{c(1)}} \right) + \lambda_c^{(1)} \frac{e_{11}^c}{e_{11}^{c(1)}}, \quad \lambda_c^{II} = \frac{3}{2} \frac{\dot{e}_{11}^{c(\text{уст})}}{\sigma'_{11} - (3/2)\rho_{11}^c - \bar{\sigma}_c}, \quad \lambda_c^{III} = \lambda_c^{II}(\omega)$$

получают из экспериментов при одноосном напряженном состоянии лабораторного образца [15].

В формулах (9) $\lambda_c^{(0)}$ и $\lambda_c^{(1)}$ – значения λ_c в начальной и конечной точках первого участка кривой ползучести материала; $e_{11}^{c(1)} = \chi_c^{(1)}$, $e_{11}^{c(2)} = \chi_c^{(2)}$ и $e_{11}^{c(3)} = \chi_c^{(3)}$ – границы участков кривой ползучести при одноосном напряженном состоянии; $\dot{e}_{11}^{c(\text{уст})}$ – скорость деформации ползучести на участке установившейся ползучести (второй участок кривой ползучести); ω – величина поврежденности материала; $\bar{\sigma}_c = \sqrt{(2/3)\bar{C}_c}$ – предел ползучести при одноосном напряженном состоянии [21].

Уравнения (1)–(9) описывают неустановившиеся и установившиеся участки кривой ползучести при разных уровнях напряжений и основные эффекты процесса высокотемпературной нестационарной ползучести при знакопеременном напряжении.

На стадии развития рассеянных по объему повреждений наблюдается влияние поврежденности на физико-механические характеристики материала. В первом приближении это влияние может быть учтено на базе концепции деградирующего континуума (введения эффективных напряжений) [3]:

$$\tilde{\sigma}'_{ij} = F_1(\omega)\sigma'_{ij} = \frac{G}{\tilde{G}}\sigma'_{ij}, \quad \tilde{\sigma} = F_2(\omega)\sigma = \frac{K}{\tilde{K}}\sigma, \quad (10)$$

\tilde{G}, \tilde{K} – эффективные модули упругости, определяемые по формулам Мак-Кензи [3]:

$$\tilde{G} = G(1-\omega) \left[1 - \frac{6K+12G}{9K+8G}\omega \right], \quad (11)$$

$$\tilde{K} = 4GK \frac{1-\omega}{4G+3K\omega}. \quad (12)$$

Аналогично определяется эффективная внутренняя переменная $\tilde{\rho}_{ij}^c$:

$$\tilde{\rho}_{ij}^c = F_1(\omega)\rho_{ij}^c = \frac{G}{\tilde{G}}\rho_{ij}^c. \quad (13)$$

Эволюционные уравнения накопления повреждений

Постулируем, что скорость процесса накопления повреждений при нестационарной ползучести определяется эволюционным уравнением вида [1–4]:

$$\dot{\omega} = f_1(\beta)f_2(\omega)f_3(W_c)f_4(\dot{W}_c), \quad (14)$$

где функции $f_i, i = \overline{1,4}$, учитывают: $f_1(\beta)$ – объемность напряженного состояния, $f_2(\omega)$ – уровень накопленной поврежденности, $f_3(W_c)$ – накопленную относительную энергию повреждения, затраченную на образование дефектов, $f_4(\dot{W}_c)$ – скорость изменения энергии повреждения.

В уравнении (14):

$$f_1(\beta) = \exp \beta, \quad f_2(\omega) = \begin{cases} 0, & W_c \leq W_c^a, \\ \omega^{1/3}(1-\omega)^{2/3} \wedge W_c > W_c^a \wedge \omega \leq 1/3, & \\ (\sqrt[3]{16/9}\omega^{-1/3}(1-\omega)^{-2/3} \wedge W_c > W_c^a \wedge \omega > 1/3, & \end{cases} \quad (15)$$

$$f_3(W_c) = \frac{W_c - W_c^a}{W_c - W_c^f}, \quad f_4(\dot{W}_c) = \frac{\dot{W}_c}{W_c - W_c^f}, \quad (16)$$

где β – параметр объемности напряженного состояния ($\beta = \sigma/\sigma_n$), W_c^a – значение энергии повреждения в конце стадии зарождения рассеянных повреждений при длительной прочности, а W_c^f – значение энергии, соответствующее образованию макроскопической трещины.

Длительность фазы зарождения микродефектов будем связывать со значением параметра W_c^a . Когда микродефекты вырастают до размеров, сопоставимых со средним расстоянием между ними, начинается процесс слияния (разрыв оставшихся промежутков сплошности между дефектами). В настоящей статье детальная модель слияния полостей не строилась, а для учета этого процесса кинетическое уравнение (за счет члена $f_2(\omega)$) сформулировано таким образом, чтобы при достижении поврежденностью значения $\omega = 1/3$ зависимость $\dot{\omega} = f_1(\omega)$ учитывала «лавинообразное» нарастание величины поврежденности.

Критерий прочности поврежденного материала

В качестве критерия окончания фазы развития рассеянных микрповреждений (стадии образования макротрещины) принимается условие достижения величиной поврежденности своего критического значения:

$$\omega = \omega_f \leq 1. \quad (17)$$

Интегрируя эволюционное уравнение накопления повреждений (14)–(16) совместно с определяющими соотношениями термовязкопластичности (1)–(9) и критерием разрушения (17), по известной истории термомеханического нагружения в данном элементарном объеме материала можно определить момент образования макроскопической трещины при деградации материала по механизму длительной прочности [22].

2. Результаты исследований

В серии экспериментов [23] были представлены результаты исследований высокотемпературной ползучести нержавеющей стали X18H10T при температуре $T = 850 \text{ }^\circ\text{C}$ и напряжениях $\sigma_{11} = 40, 50, 60$ и 80 МПа в условиях осевого растяжения.

Физико-механические характеристики нержавеющей стали X18H10T и материальные параметры модели МПС приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные физико-механические характеристики и материальные параметры модели МПС нержавеющей стали X18H10T

$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$K, \text{ МПа}$	$G, \text{ МПа}$	$\bar{C}_c, \text{ МПа}$	$\lambda_c^{(0)}, \text{ 1/МПа}\cdot\text{час}$	$\lambda_c^{(1)}, \text{ 1/МПа}\cdot\text{час}$	$g_1^c, \text{ МПа}$	g_2^c	$W_c^f, \text{ МДж/м}^3$	$W_{a_s}^f, \text{ МДж/м}^3$	α_c	$\chi_c^{(1)}$
850	62855	29010	17	0,00011	0,00011	19000	224	4,7	0,3	1	0,03

Результаты испытаний были представлены в виде кривых ползучести (зависимости $e_{ij}^c \sim t$) на рис. 1.

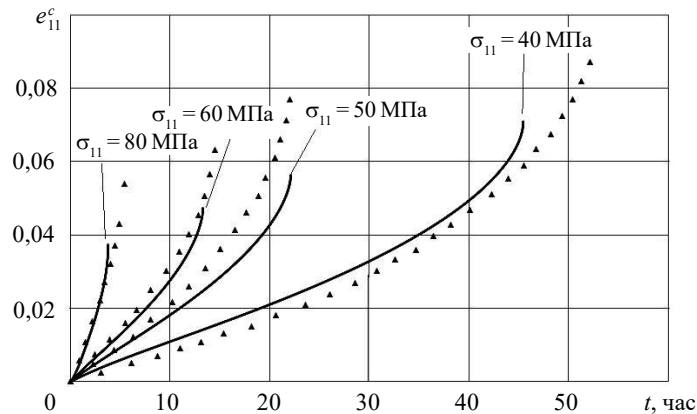


Рис. 1

Здесь сплошными линиями отмечены результаты численного моделирования с использованием определяющих соотношений МПС (1)–(17), а маркерами – соответствующие экспериментальные результаты. Видно качественное и количественное согласование опытных и расчетных данных.

На рис. 2–4 для эксперимента, соответствующего рис. 1, приведены зависимости от времени процесса: $\tilde{\rho}_{11}^c$ (рис. 2), энергии разрушения при ползучести W_c (рис. 3), величины поврежденности ω (рис. 4).

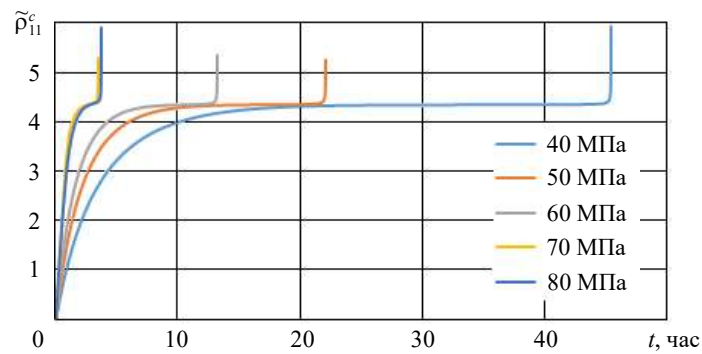


Рис. 2

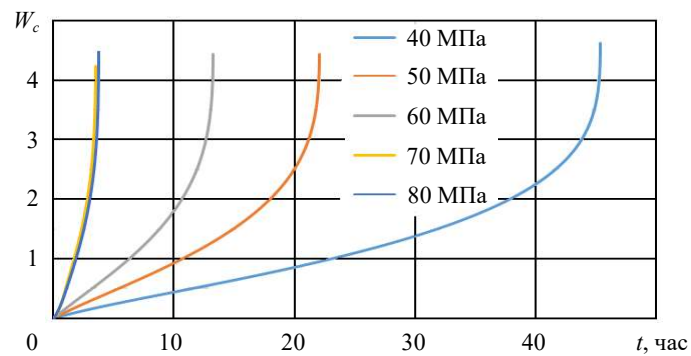


Рис. 3

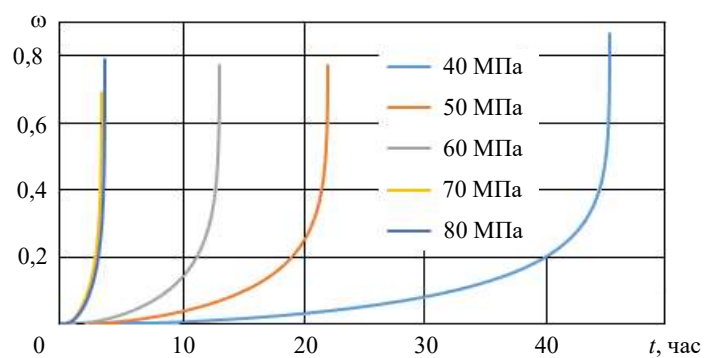


Рис. 4

Анализируя полученные численные результаты, можно отметить, что предложенная модель поврежденной среды качественно и с необходимой для практических расчетов точностью количественно описывает основные эффекты, наблюдаемые при высокотемпературной нестационарной ползучести конструкционных материалов (металлов и их сплавов), и деградацию начальных прочностных свойств материалов по механизму длительной прочности.

В следующем примере [24] представлены результаты исследований высоко-температурной нестационарной ползучести и длительной прочности цилиндрических медных образцов при растяжении. Образцы имели рабочую длину $l = 50$ мм. В каждый момент времени растягивающие напряжения σ_{11} равны 40, 50, 60 и 70 МПа. Исследование ползучести и длительной прочности проводилось при 400 °С. Исследуемый материал при 400 °С обладает нелинейной зависимостью мгновенных деформаций от напряжений, а рабочий диапазон изменений напряжений $\sigma_{11} = 40\text{--}70$ МПа находится выше предела текучести.

Физико-механические характеристики меди и материальные параметры модели МПС приведены в таблице 2.

Таблица 2

Основные физико-механические характеристики и материальные параметры модели МПС меди

$T, ^\circ\text{C}$	χ_c	\bar{C}_c , МПа	σ_u , МПа	$\lambda_c^{(0)}$, 1/МПа·час	σ_u , МПа	$\lambda_c^{(1)}$, 1/МПа·час	g_1^c , МПа	g_2^c	W_c^f , МДж/м ³	W_a^f , МДж/м ³	$\chi_c^{(1)}$
400	0	14,7	32,7	0,000213	32,7	0,000213	2500	227,2	5,4	3,5	0,015
	0,444	14,7									
	0,052	14,5	40,8	0,000213	40,8	0,000213					
	0,074	12,0									
	0,088	8,50	49,0	0,000223	49,0	0,000223					
	0,111	5,00									
	0,012	4,3	57,2	0,000413	57,2	0,000413					
	0,126	4									

Результаты испытаний представлены в виде кривых ползучести $e_{11}^c(t)$.

На рис. 5 представлены кривые ползучести при температуре $T = 400$ °С и уровнях напряжений $\sigma_{11} = 40, 50, 60$ и 70 МПа.

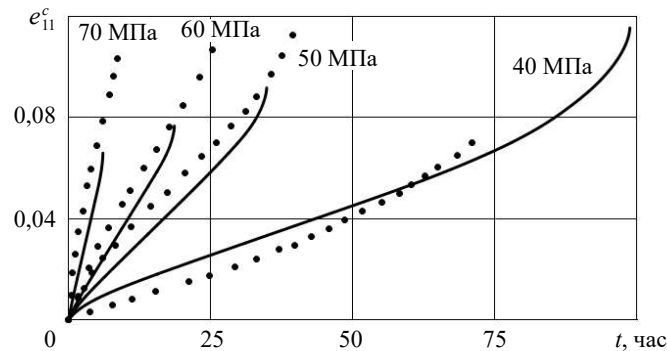


Рис. 5

Здесь сплошными линиями отмечены результаты численного моделирования с использованием определяющих соотношений МПС (1)–(17), а маркерами – экспериментальные результаты. Видно качественное и количественное соответствие опытных и расчетных данных.

На рис. 6–9 для различных уровней напряжений приведены зависимости: $\tilde{\rho}_{11}^c$ от e_{11}^c (рис. 6), эффективного радиуса поверхности ползучести нулевого уровня \bar{C}_c от e_{11}^c (рис. 7); энергии разрушения при ползучести W_c от времени процесса t (рис. 8), величины поврежденности ω от времени процесса t (рис. 9).

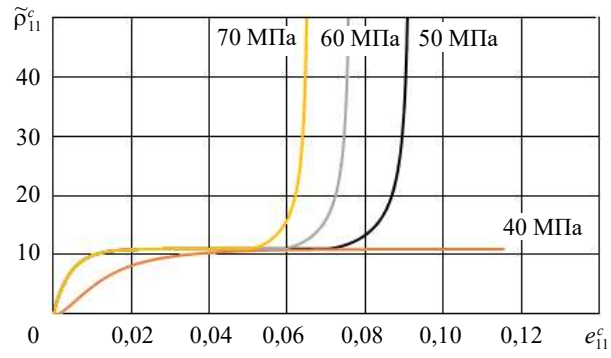


Рис. 6

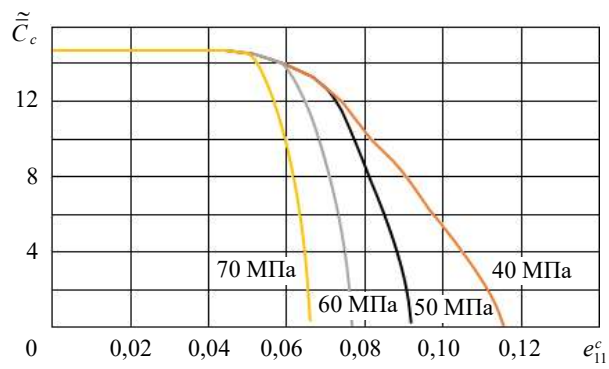


Рис. 7

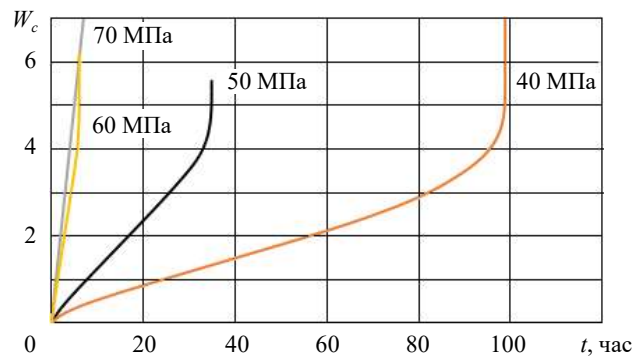


Рис. 8

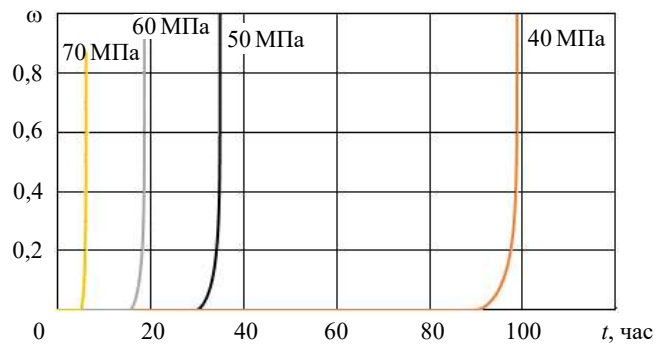


Рис. 9

На рис 10 представлена кривая длительной прочности (зависимость времени до разрушения t_f от номинального напряжения σ_{11}) в логарифмических координатах $\lg \sigma_{11} - \lg t_f$. Здесь сплошными линиями отмечены результаты численного моделирования с использованием определяющих соотношений МПС (1)–(17), а маркерами – соответствующие экспериментальные результаты. Видно качественное и количественное согласование опытных и расчетных данных.

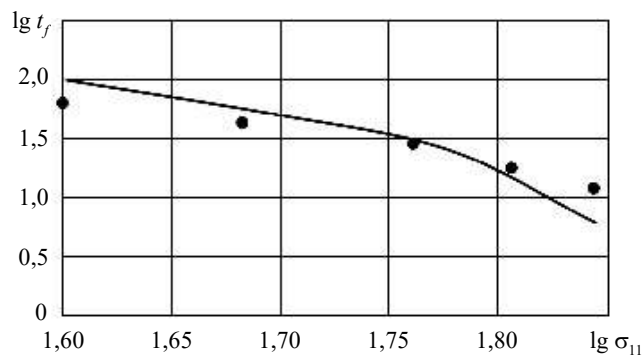


Рис. 10

Зависимость обнаруживает характерный для ряда металлов излом внутри рассматриваемого диапазона изменения напряжений σ_{11} (при $\sigma_{11} = 56$ МПа). По-видимому, этот излом разделяет области напряжений с различными механизмами разрушения. Именно изменением приоритетного механизма длительного разрушения обычно объясняется наличие излома на кривой длительной прочности в логарифмических координатах $\lg \sigma_{11} - \lg t_f$.

Анализируя полученные численные результаты, можно отметить, что предложенная модель поврежденной среды качественно и с необходимой для практических расчетов точностью количественно описывает основные эффекты, наблюдаемые при нестационарной ползучести конструкционных материалов (металлов и их сплавов), и деградацию начальных прочностных свойств материалов по механизму длительной прочности.

Заключение

Для описания процессов высокотемпературной ползучести и длительной прочности конструкционных материалов (металлов и их сплавов) применена математическая модель механики поврежденной среды (МПС), описывающая процессы неупругого деформирования и накопления повреждений при ползучести.

Методом численного моделирования и сравнения полученных результатов с опытными данными проведена оценка достоверности определяющих соотношений МПС при ползучести, которая позволяет сделать вывод о достоверности развитых модельных представлений и точности разработанной методики определения материальных параметров, входящих в указанные соотношения.

Список литературы

1. Митенков Ф.М., Кайдалов В.Ф., Коротких Ю.Г. и др. *Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок*. М.: Машиностроение, 2007. 445 с.
2. Волков И.А., Коротких Ю.Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями*. М: Физматлит, 2008. 424 с.

3. Волков И.А., Игумнов Л.А. *Введение в континентальную механику поврежденной среды*. М.: Физматлит, 2017. 304 с.
4. Volkov I., Igumnov L., Litvinchuk S. Creep and long-term strength of structures. *Structural Integrity*. 2020. Vol. 16. P. 305–308.
5. Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г. *Прикладная теория вязкопластичности*. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. 318 с.
6. Локощенко А.М. *Ползучесть и длительная прочность металлов*. М.: Физматлит, 2016. 504 с.
7. Lemaitre J. Damage modelling for prediction of plastic or creep fatigue failure in structures. *Transactions of 5th International Conferences SMRiT*. North Holland. 1979. Paper No L5/1b. P. 1–8.
8. Murakami S. Mechanical description of creep damage and its experimental verification. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 1982. No 1. P. 743–761.
9. Мэнсон С., Энсайн А. Успехи за последнюю четверть века в развитии методов корреляции и экстраполяции результатов испытаний на длительную прочность. *Теоретические основы инженерных расчетов*. 1979. Т. 101. №4. С. 9–18.
10. Ле Мэй Д. Развитие параметрических методов обработки результатов испытаний на ползучесть и длительную прочность. *Теоретические основы инженерных расчетов*. 1979. Т. 101. №4. С. 19–24.
11. Larson P.R., Miller J.A. A time-temperature relationship for rupture and creep stress. *Transactions of ASME*. 1952. Vol. 74. P. 765–771.
12. Никитенко А.Ф. Экспериментальное обоснования гипотезы существования поверхности ползучести в условиях сложного нагружения: Сообщение 1, 2. *Проблемы прочности*. 1984. №8. С. 3–11.
13. Вудфорд Д.А. Повреждение при ползучести и концепция остаточной долговечности. *Теоретические основы инженерных расчетов*. 1979. Т. 101. №4. С. 1–8.
14. Betten J. Mathematical modelling of materials behavior under creep conditions. *Applied Mechanics Reviews*. 2001. Vol. 54. No 2. P. 107–132. DOI: 10.1115/1.3097292.
15. Боднер С.Р., Линдхолм У.С. Критерий приращения повреждения для зависящего от времени разрушения материалов. *Труды Америк. об-ва инж.-мех. Сер. Д. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1976. Т. 100. №2. С. 51–58.
16. Леметр Ж. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов. *Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер. Д. Теоретические основы инженерных расчетов*. 1985. Т. 107. №1. С. 90–98.
17. Benallal A., Marquis D. Constitutive equations for nonproportional cyclic elasto-viscoplasticity. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1987. Vol. 109. P. 326–337. DOI: 10.1115/1.3225985.
18. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*. 1989. Vol. 5. Iss. 3. P. 247–302. DOI:10.1016/0749-6419(89)90015-6.
19. Hayhurst D.R., Brown P.R., Morrison C.J. The role of continuum damage in creep crack growth. *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1984. Vol. 311. No 1516. P. 131–158. DOI: 10.1098/rsta.1984.0022.
20. Yao Hua-Tang, Xuan Fu-Zhen, Wang Zhengdong, Tu Shan-Tung. A review of creep analysis and design under multi-axial stress states. *Nuclear Engineering and Design*. 2007. Vol. 237. P. 1969–1986.
21. Volkov I.A., Tarasov I.S., Smetanin I.V., Igumnov L.A., Kazakov D.A., Shishulin D.N. Constitutive relations of the mechanics of a damaged medium for evaluating the creep-rupture strength of structural alloys. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019. Vol. 60. Iss. 1. P. 156–166. DOI: 10.1134/S002189441901019X.
22. Волков И.А., Игумнов Л.А., Казаков Д.А., Емельянов А.А., Тарасов И.С., Гусева М.А. Программная реализация процессов вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах при термомеханическом нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №2. С. 188–207.
23. Локощенко А.М., Шестериков С.А. Модель длительной прочности с немонотонной зависимостью деформации при разрушении от напряжения. *Прикладная механика и техническая физика*. 1982. № 1. С. 160–163.

24. Локощенко А.М. Новый метод измерения поврежденности металлов при ползучести. *Изв. РАН. МТТ*. 2005. №5. С. 108–122.

References

1. Mitenkov F.M., Kaydalov V.B., Korotkikh Yu.G. et al. *Metody obosnovaniya resursa YaEU [Methods of Substantiating the Resource of Nuclear Power Plants]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 2007. 445 p. (In Russian).
2. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Uravneniya sostoyaniya vyazkouprugoplasticheskikh sred spovrezhdeniyami [Equations of State of Viscoelastic Plastic Media with Damage]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 424 p. (In Russian).
3. Volkov I.A., Igumnov L.A. *Vvedenie v kontinualnuyu mekhaniku povrezhdennoy sredy [Introduction to the Continuum Mechanics of a Damaged Medium]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2017. 304 p. (In Russian).
4. Volkov I., Igumnov L., Litvinchuk S. Creep and long-term strength of structures. *Structural Integrity*. 2020. Vol. 16. P. 305–308.
5. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G. *Prikladnaya teoriya vyazkoplastichnosti [Applied Theory of Viscoplasticity]*. Nizhny Novgorod. UNN Publ. 2015. 318 p. (In Russian).
6. Lokoshchenko A.M. *Polzuchest i dlitel'naya prochnost metallov [Creep and Long-Term Strength of Metals]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2016. 504 p. (In Russian).
7. Lemaitre J. Damage modelling for prediction of plastic or creep fatigue failure in structures. *Trans. 5th Int. Conf. SMRiT*. North Holland. 1979. Paper No. L5/1b. P. 1–8.
8. Murakami S. Mechanical description of creep damage and its experimental verification. *J. Mec. Theor. Appl.* 1982. No 1. P. 743–761.
9. Manson S.S., Ensign C.R. A quarter-century of progress in the development of correlation and extrapolation methods for creep rupture data. *J. Eng. Mater. Technol.* 1979. Vol. 101. No 4. P. 317–325.
10. Le May D. Developments in parametric methods for handling creep and creep-rupture data. *J. Eng. Mater. Technol.* 1979. Vol. 101. No 4. P. 326–330. DOI: 10.1115/1.3443697.
11. Larson P.R., Miller J.A. A time-temperature relationship for rupture and creep stress. *Transactions of ASME*. 1952. Vol. 74. P. 765–771.
12. Nikitenko A.F. Experimental verification of the hypothesis of the existence of surface creep under complex loading conditions. Report No 1-2. *Strength of Materials*. 1984. Vol. 16. Iss. 8. P. 1063–1071.
13. Woodford D.A. Creep damage and the remaining life concept. *ASME J. Eng. Mat. Technol.* 1979. Vol. 101. No 4. P. 311–316.
14. Betten J. Mathematical modelling of materials behavior under creep conditions. *Appl. Mech. Rev.* 2001. Vol. 54. No 2. P. 107–132. DOI: 10.1115/1.3097292.
15. Bodner S.R., Lindholm W.S. Kriteriy prirashcheniya povrezhdeniya dlya zavisyashchegoot vremeni razrusheniya materialov [Damage increment criterion for time-dependent fracture of materials]. *American Society of Mechanical Engineers. Series. Theoretical Foundations of Engineering Calculations*. 1976. Vol. 100. No 2. P. 51–58 (In Russian).
16. Lemaitre J.A. Continuous damage mechanics model for ductile fracture. *J. Eng. Mater. Technol.* 1985. Vol. 107. Iss. 1. P. 83–89. DOI: 10.1115/1.3225775.
17. Benallal A., Marquis D. Constitutive equations for nonproportional cyclic elasto-viscoplasticity. *J. Eng. Mater. Technol.* 1987. Vol. 109. P. 326–337. DOI: 10.1115/1.3225985.
18. Chaboche J.L. Constitutive equation for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *Inter. J. Plasticity*. 1989. Vol. 5. Iss. 3. P. 247–302. DOI:10.1016/0749-6419(89)90015-6.
19. Hayhurst D.R., Brown P.R., Morrison C.J. The role of continuum damage in creep crack growth. *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1984. Vol. 311. No 1516. P. 131–158. DOI: 10.1098/rsta.1984.0022.
20. Yao Hua-Tang, Xuan Fu-Zhen, Wang Zhengdong, Tu Shan-Tung. A review of creep analysis and design under multi-axial stress states. *Nuclear Engineering and Design*. 2007. Vol. 237. P. 1969–1986.
21. Volkov I.A., Tarasov I.S., Smetanin I.V., Igumnov L.A., Kazakov D.A., Shishulin D.N. Constitutive relations of the mechanics of a damaged medium for evaluating the creep-rupture

strength of structural alloys. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2019. Vol. 60. Iss. 1. P. 156–166. DOI: 10.1134/S002189441901019X.

22. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G., Kazakov D.A., Yemelyanov A.A., Tarasov I.S., Guseva M.A. Programmaya realizatsiya protsessov vyzkoplasticheskogo deformirovaniya i nakopleniya povrezhdeniy v konstruktsionnykh splavakh pri termomekhanicheskom nagruzhenii [Software implementation of viscoplastic deformation and damage accumulation processes in structural alloys under thermal-mechanical loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [*Problems of Strength and Plasticity*]. 2016. Vol. 78. No 2. P. 188–207 (In Russian).

23. Lokoshchenko A.M., Shesterikov S.A. Model dlitelnoy prochnosti s nemonotonnoy zavisimost'yu deformatsii pri razrushenii ot napryazheniya [A model of long-term strength with a non-monotonic dependence of strain at fracture on stress]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [*Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*]. 1982. No 1. P. 160–163 (In Russian).

24. Lokoshchenko A.M. Novyy metod izmereniya povrezhdennosti metallov pri polzuchesti [A new method for measuring the damage of metals during creep]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdrogo tela* [*Mech. Solids*]. 2005. No 5. P. 108–122 (In Russian).

NUMERICAL STUDY OF THE PROCESS OF HIGH-TEMPERATURE CREEP AND LONG-TERM STRENGTH OF STRUCTURAL ALLOYS UNDER UNIAXIAL TENSION

Smetanin I.V.

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

The main regularities of deformation processes are considered and degradation of the initial strength properties of structural materials (metals and their alloys) by the mechanism of long-term strength. To describe the processes of high-temperature creep and long-term strength of polycrystalline structural alloys, an approach based on the concept of “hidden” or “internal” parameters is used, which can give a qualitative and quantitative description of experimental data. This approach has two important advantages: it allows you to cover a wide range of behavior of structural materials and at the same time it is very convenient for analyzing the stress-strain state. The mathematical model of the mechanics of a damaged medium used in this work, describing the processes of inelastic deformation and damage accumulation during creep, consists of three interrelated components: evolutionary relations that determine the inelastic behavior of the material, considering the dependence on the destruction process; kinetic equations describing the process of damage accumulation; criteria for the strength of the damaged material.

The variant of the determining relations of viscoplastic deformation of polycrystalline structural alloys is based on the idea of the existence of a family of equipotential creep surfaces in the stress space and the principle of gradient of the creep strain rate vector to the corresponding surface at the loading point. This version of the equations of state reflects the main regularities of the process of viscoplastic deformation of the material under proportional and disproportionate modes of combined thermomechanical loading.

The variant of the kinetic equations of damage accumulation is based on the introduction of a scalar damage parameter, is based on energy principles, and considers the main effects of the formation, growth and fusion of microdefects for arbitrary complex modes of thermomechanical loading. As a criterion of the strength of the damaged material, the condition for reaching the critical value of the damage value is used.

The results of experimental studies of short-term high-temperature creep of several structural alloys (copper, stainless steel X18H10T) at constant temperature values and various levels of forces set in the samples are presented.

To assess the degree of reliability and determine the limits of applicability of models of the mechanics of the damaged medium numerical studies of the process of high-temperature creep and long-term

strength of these structural alloys are carried out and the numerical results obtained are compared with the data of field experiments. The results of comparing the calculated and experimental data allow us to conclude that the proposed determining relationships are reliable when the initial strength properties of structural materials are degraded by the mechanism of long-term strength. It is shown that the model used qualitatively and with the accuracy necessary for practical calculations quantitatively describes the main effects of the process of viscoplastic deformation and damage accumulation in polycrystalline structural alloys under high-temperature thermomechanical loading.

Keywords: unsteady creep, long-term strength, modeling, determining relations, mechanics of the damaged medium, temperature, damage, material parameters, numerical and field experiment.