

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2022-84-2-282-301

**ОЦЕНКА РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ
ПРИ ДЕГРАДАЦИИ ПО СОВМЕСТНЫМ МЕХАНИЗМАМ
УСТАЛОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛА***

© 2022 г.

**Волков И.А.^{1,2}, Игумнов Л.А.¹,
Шишулин Д.Н.¹, Яковлев С.Г.²**

*¹Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

*²Волжский государственный университет водного транспорта,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

pmptmvgavt@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.02.2022

Обсуждается проблема оценки ресурсных характеристик ответственных инженерных объектов с учетом особенностей эксплуатационных режимов нагружения. Рассматриваются процессы деградации начальных прочностных свойств конструкционных материалов (металлов и их сплавов) при механизмах деградации, сочетающих усталость и длительную прочность материала.

С современных позиций механики поврежденной среды и механики разрушения развита математическая модель, описывающая процессы циклического вязкопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в конструкционных сплавах при многоосных непропорциональных режимах комбинированного термомеханического нагружения. Модель состоит из трех взаимосвязанных составных частей: соотношений, определяющих циклическое вязкопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения; эволюционных уравнений, описывающих кинетику процесса накопления повреждений; критерия прочности поврежденного материала.

Вариант определяющих соотношений основан на представлении о существовании в пространстве напряжений поверхностей пластичности и ползучести и принципе градиентальности векторов скоростей пластических деформаций и деформаций ползучести к соответствующей поверхности в точке нагружения. Такой вариант уравнений состояния отражает основные эффекты процесса циклического вязкопластического деформирования материала для произвольных сложных траекторий 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 при произвольных сложных режимах комбинированного

*Выполнено при финансовой поддержке РФ (грант № 22-19-00138).

термомеханического нагружения. Предложена совместная форма эволюционного уравнения накопления повреждений в областях малоциклового усталости и длительной прочности.

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

Приводятся результаты численного моделирования процессов деформирования и накопления повреждений в конструкционных сплавах при механизмах деградации, сочетающих усталость и длительную прочность материала. Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных показали, что предложенная модель механики поврежденной среды качественно и с необходимостью для практических расчетов точно количественно описывает процессы разрушения опасных зон элементов конструкций при совместных действиях деградационных механизмов усталости и длительной прочности.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, многоцикловая усталость, длительная прочность, математическое моделирование, механика поврежденной среды, напряженно-деформированное состояние, материальные параметры, базовый и натурный эксперименты, поврежденность, ресурс.

Введение

Одной из основных задач современного машиностроения является обоснование ресурса оборудования и систем ответственных инженерных объектов на стадии их проектирования, оценка выработанного и прогноз остаточного ресурса конструктивных узлов в процессе эксплуатации, продление срока службы после отработки объектами нормативного срока службы. Особенно актуальны эти задачи для объектов, срок службы которых составляет несколько десятков лет (атомные энергетические установки, нефтехимическое оборудование, резервуары для хранения газообразных и сжиженных химических продуктов, магистральные газо- и нефтепроводы, современные авиационные и ракетные двигатели и др.). Эксплуатационные условия их работы характеризуются многопараметрическими нестационарными термомеханическими воздействиями, воздействиями внешних полей различной физической природы, приводящими к развитию различных механизмов деградации начальных прочностных свойств конструкционных материалов и исчерпанию ресурса конструктивных узлов инженерного объекта в процессе эксплуатации [1].

Процессы исчерпания ресурса являются многостадийными, нелинейными, взаимосвязанными и сильно зависящими от конкретных условий изготовления и эксплуатации индивидуального объекта.

Существует большое количество механизмов, которые могут определять процессы исчерпания ресурса конкретного объекта в зависимости от условий его эксплуатации: многоцикловая усталость, малоцикловая усталость, длительная прочность, радиационные повреждения, коррозия и др. (с учетом их взаимодействия). Для указанных механизмов образование макроскопической трещины является результатом последовательного действия определенного числа очень сложных с физической точки зрения процессов преобразования начальной структуры материала, включающих в себя зарождение, развитие и взаимодействие различных дефектов кристаллической решетки в металлах, и взаимодействие иерархических структурных составляющих различного уровня.

Реальные условия нагружения многих конструктивных элементов характеризуются циклическим изменением внешней нагрузки и температуры. Процесс разру-

шения при взаимном влиянии процессов усталости и длительной прочности происходит в результате циклического приложения нагрузки при повышенной температуре, выдержках нагрузки различной длительности и активации механизмов деформации, зависящих от времени. Повреждения от ползучести и нестационарной пластической деформации материала различны по своей физической природе. Можно считать, что повреждение при ползучести носит межкристаллитный характер, в то время как усталостное повреждение соответствует накоплению микро- и макротрещин по телу зерна. Когда в соответствии с условиями нагружения (циклическая деформация с выдержками при высокой температуре) оба процесса развиваются одновременно, имеется возможность для их взаимодействия, которая проявляется в виде сильно нелинейных эффектов, неблагоприятных для общей долговечности материала [2–8]. На микроскопическом уровне это объясняется тем, что межкристаллитные микротрещины при ползучести имеют тенденцию к образованию и развитию на очень раннем этапе жизни элементарного объема конструкционного материала. Присутствие таких дефектов за счет ползучести способствует зарождению транскристаллитных трещин при усталости.

Основные эффекты взаимодействия усталости и ползучести заключаются в следующем [2–8]:

1. Снижение скорости циклического вязкопластического деформирования конструкционных сплавов при высоких температурах T ($T > 0,4T_{пл}$, $T_{пл}$ – температура плавления) приводит в результате малоциклового усталости к изменению характера разрушения материала от транскристаллитного к межзеренному разрушению из-за процессов циклической ползучести.

2. При симметричном циклическом деформировании материала выдержки при растяжении значительно снижают усталостную долговечность по сравнению с циклированием без выдержек (~ в 5-6 раз), в то время как выдержки при сжатии практически не влияют на усталостную долговечность. Блочные циклические нагружения с выдержками при сжатии не опаснее деформирования по соответствующему пилообразному циклу.

3. Проблемы влияния порядка чередования этапов быстрого пластического деформирования и медленного деформирования при ползучести в настоящее время изучены недостаточно. Исследованиям подвергались две стороны проблемы: влияние на долговечность характера нагружения внутри цикла (последовательность этапов быстрого и медленного нагружения) и связь усталостной долговечности с порядком чередования разнотипных циклов в программе нагружения лабораторного образца. Однако исследования нержавеющей стали типа 304 и 316 показывают [4, 5], что при том же периоде цикла без выдержек циклы «медленно-быстро» сильнее влияют на долговечность в сторону ее уменьшения, чем циклы «быстро-медленно». Эти результаты выдвигают на первый план важность рассмотрения деталей формы цикла при любом подходе к оценке степени поврежденности материала при взаимодействии усталости и длительной прочности.

4. Изучение влияния фазности механического нагружения и нагрева позволило установить, что наименьшей долговечности отвечают случаи, когда максимальная температура цикла T_{max} достигается в полупереме растяжения, а минимальная T_{min} – в полупереме сжатия.

К настоящему времени сложилась система классификации критериев малоциклового разрушения при ползучести в условиях высоких температур в зависимости

от меры интенсивности накопления усталостного повреждения и типа уравнений, определяющих параметр повреждения [9]. Наиболее представительными являются группы критериев следующих типов: деформационные (включающие деформацию или ее составляющие, которые характеризуют цикл деформирования в целом); кинетические (определяющие скорость повреждения и его критическое значение); энергетические (связывающие процесс накопления повреждений с диссипацией энергии неупругого деформирования); критерии, базирующиеся на характеристиках длительной прочности. Достаточно полные обзоры по этому вопросу содержатся в публикациях [10–13].

Отметим, что названные критерии удовлетворительно описывают закономерности малоциклового разрушения при сравнительно простых программах нагружения и утрачивают это свойство, когда требуется описать влияние особенностей конкретного цикла, например характер (ползучесть, релаксация) выдержки, порядок чередования этапов пластического и вязкого деформирования в полцикле как растяжения, так и сжатия, закон изменения температуры и т.п.

Таким образом, до сих пор ни процесс накопления повреждений в результате ползучести, ни процесс накопления повреждений в результате малоциклового усталости как следует не изучены, поэтому не удивительно, что процесс, при котором одновременно протекают и взаимодействуют оба вида поврежденности, также до конца не изучен. Тем не менее в ряде практически важных случаев эти процессы протекают одновременно, взаимодействуя друг с другом, значительно влияя на ресурс элемента конструкции.

Полученные в настоящее время результаты [4–7] приводят к выводу, что линейный закон суммирования повреждений (гипотеза Пальмгрена – Майнера) при деградации начальных прочностных свойств материала по совместным механизмам малоциклового усталости и длительной прочности не применим, поскольку это совершенно различные процессы, обладающие нелинейным взаимодействием. Для описания процесса суммирования повреждений от этих механизмов предложено несколько подходов, в основном имеющих эмпирический или полуэмпирический характер и справедливых только для частных законов нагружения [4–7, 14–16]. По-видимому, единственным из существующих в настоящее время возможных способов оценки ресурсных характеристик материалов, позволяющих исследовать сложные процессы нагружения, является способ разделения деформаций в цикле на пластическую деформацию и деформацию ползучести. Этот способ позволяет анализировать результаты совместного действия процессов ползучести и усталости, а также интерпретировать влияние частоты, времени выдержки и условий окружающей среды.

В настоящей статье с современных позиций механики поврежденной среды (МПС), механики разрушения развита математическая модель, описывающая процессы циклического вязкопластического деформирования и накопления повреждений в конструкционных материалах (металлах и их сплавах) при деградации начальных прочностных свойств материалов по совместным механизмам малоциклового усталости и длительной прочности. В целях качественной и количественной оценки модели проведено исследование влияния законов изменения механической деформации и температуры (формы цикла нагружения) на долговечность конструкционных сталей при различных формах цикла нагружения.

1. Определяющие соотношения математической модели механики поврежденной среды

Модель поврежденной среды, в рамках которой разработана процедура моделирования процессов суммирования повреждений при механизмах деградации, сочетающих усталость и длительную прочность, состоит из трех взаимосвязанных составных частей [17–20]:

- определяющих соотношений, описывающих вязкопластическое поведение материала с учетом зависимости от процесса разрушения;
- эволюционных уравнений, описывающих кинетику накопления повреждений;
- критерия прочности поврежденного материала.

1.1. Определяющие соотношения термовязкопластичности

Определяющие соотношения термовязкопластичности базируются на следующих основных положениях:

- материал среды начально изотропен и повреждения в нем отсутствуют (учитываются только анизотропия, вызванная процессами пластичности и ползучести; анизотропия упругих свойств, вызванная процессами поврежденности материала, не учитывается);

– тензоры деформаций e_{ij} и скоростей деформаций \dot{e}_{ij} представляют собой суммы «мгновенной» и «временной» составляющих. «Мгновенные» составляющие тензоров включают в себя упругие e_{ij}^e, \dot{e}_{ij}^e (не зависящие от истории нагружения и определяющиеся конечным состоянием процесса) и пластические компоненты e_{ij}^p, \dot{e}_{ij}^p (зависящие от истории процесса нагружения). Временная составляющая тензоров деформаций e_{ij}^c, \dot{e}_{ij}^c связана с эволюцией процесса ползучести;

– начальная поверхность текучести в пространстве напряжений описывается гиперсферой Мизеса. Эволюция изменения поверхности текучести описывается изменением ее радиуса C_p и перемещением ее центра $\dot{\rho}_{ij}^c$;

– в пространстве напряжений существует семейство эквипотенциальных поверхностей ползучести с радиусом C_c , имеющих общий центр ρ_{ij}^c ;

– справедлив принцип градиентальности;

– изменение объема тела упруго, $e_{ij}^h = 0$, где $e_{ij}^h = e_{ij}^p + e_{ij}^c$;

– рассматриваются процессы деформирования, характеризуемые малыми деформациями;

– единственным структурным параметром, характеризующим на макроуровне степень поврежденности материала, является скалярный параметр ω – поврежденность ($\omega_0 \leq \omega \leq \omega_f$);

– влияние уровня накопленной поврежденности на процессы деформирования материала учитывается путем введения эффективных напряжений.

В упругой области девиаторные σ'_{ij}, e'_{ij} и шаровые σ, e составляющие тензоров напряжений σ_{ij} и деформаций e_{ij} , а также их скоростей связаны обобщенным законом Гука:

$$\sigma = 3K[e - \alpha(T - T_0)], \quad \sigma'_{ij} = 2Ge'_{ij}, \quad \dot{\sigma} = 3K(\dot{e} - \dot{\alpha}T - \alpha\dot{T}) + \frac{\dot{K}}{K}\sigma, \quad (1)$$

$$\dot{\sigma}'_{ij} = 2G\dot{e}'_{ij} + \frac{\dot{G}}{G}\sigma'_{ij},$$

где $\alpha(T)$ – коэффициент температурного расширения материала, $K(T)$ – модуль

объемной упругости, $G(T)$ – модуль сдвига, T_0 – базовая температура, T – текущая температура.

Для описания эффектов монотонного и циклического упрочнения в пространстве напряжений вводится поверхность текучести в форме Мизеса [21, 22]:

$$F_p = S_{ij}S_{ij} - C_p^2 = 0, \quad S_{ij} = \sigma'_{ij} - \rho_{ij}^{pl}, \quad (2)$$

где C_p – радиус поверхности текучести, а ρ_{ij}^{pl} – координаты ее центра.

Для описания сложных циклических режимов деформирования в пространстве деформаций вводится поверхность циклической «памяти» [23]:

$$a_e = (e_{ij}^p - \xi_{ij})(e_{ij}^p - \xi_{ij}) - a_{\max}^2 = 0, \quad (3)$$

где a_{\max} – максимальное значение интенсивности тензора пластических деформаций e_{ij}^p , а ξ_{ij} – тензор односторонне накопленных пластических деформаций.

При моделировании кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) при пластическом деформировании материала необходимо максимально достоверно описывать процессы упрочнения и разупрочнения конструкционных материалов, так как эти механизмы играют определяющую роль в точности оценок ресурсных характеристик материала. При усталостном нагружении реализуется конкуренция процессов упрочнения и разупрочнения, вызванных в материале механизмами изменения фазового состава, микроструктурного состояния, изменением плотности дислокаций, а также влиянием изменения температуры [4, 5]. Физические процессы, протекающие в поликристаллических металлах и сплавах и влияющие на процессы упрочнения и разупрочнения, зависят от действующей температуры, вида траектории деформирования, длины пути пластического деформирования, действующих амплитуд интенсивности пластической деформации и степени стабилизации процесса деформирования.

Для учета эффектов упрочнения и разупрочнения, проявляющихся вследствие синергетического действия различных физических механизмов в поликристаллических конструкционных сплавах, таких как мартенситные фазовые превращения, изменение дислокационной плотности, изменение текстуры, выделение карбидов и др. [23], скорость изменения радиуса поверхности пластического нагружения принимается в виде суммы скоростей изменения радиуса поверхности пластического нагружения с учетом вклада каждого физического механизма:

$$\begin{aligned} \dot{C}_p(\chi, T) &= \sum_{i=1}^n \dot{C}_p^{mon}(\chi, T) + \sum_{j=1}^m \dot{C}_p^{cyc}(\chi, T) + \dot{C}_p^T(\chi, T) = \\ &= \sum_{i=1}^n q_\chi^{(i)} f_m^{(i)}(\chi, T) \dot{\chi} + \sum_{j=1}^m a_j (Q_s^{(j)} - C_p^{(j)}) f_c^{(j)}(\chi, T) \dot{\chi} + q_T \dot{T}, \end{aligned}$$

где первое слагаемое описывает изменение радиуса поверхности текучести при монотонном нагружении материала, второе – при циклическом нагружении, а третье – за счет изменения температуры T ; $q_\chi^{(i)}$ – параметры монотонного упрочнения (разупрочнения) за счет вклада i -го физического механизма; a_j , $Q_{1,2}^p$ – параметры циклического упрочнения (разупрочнения) за счет вклада j -го физического механизма; $f_m^{(i)}(\chi, T)$ и $f_c^{(j)}(\chi, T)$ – функции, учитывающие характер неупругого деформирования; q_T – материальный параметр, характеризующий скорость изменения радиуса поверхности пластического нагружения за счет изменения температуры.

В настоящей статье скорость изменения радиуса поверхности текучести с учетом взаимного влияния процессов пластического деформирования и процесса ползучести принимается в виде:

$$\dot{C}_p(\chi, T) = \dot{C}_p^{mon}(\chi) + \dot{C}_p^{cyc(p)}(\chi) + \dot{C}_p^{cyc(c)}(\chi) + \dot{C}_p^T(T), \quad (4)$$

где $\dot{C}_p^{mon}(\chi)$ – скорость изменения радиуса поверхности текучести при монотонном деформировании, $\dot{C}_p^{cyc(p)}(\chi)$ – скорость изменения радиуса поверхности текучести вследствие циклического упрочнения (разупрочнения) материала, $\dot{C}_p^{cyc(c)}(\chi)$ – скорость изменения радиуса поверхности текучести вследствие влияния процесса ползучести материала, а $\dot{C}_p^T(T)$ – скорость изменения радиуса поверхности текучести вследствие изменения температуры T .

При неупругом деформировании рассматриваемого конструкционного материала изменение фазового состава материала приводит к эффекту упрочнения (разупрочнения), а при изменении микроструктурного состояния и дислокационной картины может возникать как эффект упрочнения, так и эффект разупрочнения конструкционного материала в зависимости от вида текущей траектории деформирования, причем проявление эффекта существенно зависит от степени стабилизации процесса деформирования. Таким образом, в диапазоне температур T , при которых можно пренебречь эффектами отжига, и конкретизируя параметры в зависимости (4), изотропное упрочнение (разупрочнение) материала можно представить в виде:

$$\dot{C}_p(\chi, T) = q_\chi \dot{\chi}_p^{mon} + a_p (Q_p^p - C_p^{cyc(p)}) \dot{\chi}_p^{cyc} + a_c (Q_p^c - C_p^{cyc(c)}) \dot{\chi}_c^{cyc} + q_T \dot{T}, \quad (5)$$

$$C_p = C_p^0 + \int_0^t \dot{C}_p^0 dt, \quad (6)$$

$$q_\chi = q_2 A + (1 - A) q_1, \quad Q_p^p = Q_2^p A + (1 - A) Q_1^p, \quad Q_p^c = Q_2^c A + (1 - A) Q_1^c, \quad (7)$$

$$A = 1 - \cos^2 \Theta, \quad \cos \Theta = \frac{e_{ij}^e n_{ij}^s}{(e_{ij}^e e_{ij}^e)^{1/2}}, \quad n_{ij}^s = \frac{s_{ij}}{(s_{ij} s_{ij})^{1/2}},$$

$$\dot{\chi}_p = \left(\frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \right)^{1/2}, \quad \chi_p = \int_0^t \dot{\chi}_p dt, \quad \dot{\chi}_\xi = \left(\frac{2}{3} \dot{\xi}_{ij}^p \dot{\xi}_{ij}^p \right)^{1/2}, \quad \chi_\xi = \int_0^t \dot{\chi}_\xi dt, \quad (8)$$

$$\dot{\chi}_p^{mon} = \begin{cases} 0 & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \leq 0, \\ \dot{\chi}_p & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \geq 0, \end{cases} \quad \dot{\chi}_p^{cyc} = \begin{cases} \dot{\chi}_p & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \leq 0, \\ 0 & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p \geq 0. \end{cases} \quad (9)$$

В формулах (5)–(9) введены следующие обозначения: C_p^0 – значение начального радиуса поверхности текучести; q_1, q_2, q_T – модули монотонного изотропного упрочнения (разупрочнения) при нагружениях по лучевым путям, при изломе траектории деформирования на 90° и изменении температуры T соответственно; $Q_{1,2}^p, Q_{1,2}^c$ – модули циклического изотропного упрочнения (разупрочнения); $\dot{\chi}_p^{mon}$ – скорость изменения длины траектории пластического деформирования материала на монотонных участках; $\dot{\chi}_p^{cyc}$ – скорость изменения длины траектории пластического деформирования материала на участках регулярного и нерегулярного циклического нагружений; $\dot{\chi}_c^{cyc}$ – скорость изменения длины траектории деформирования на участках выдержки нагрузки.

Первое слагаемое в правой части уравнения (5) описывает изотропное упрочнение в результате монотонного пластического деформирования, второе – циклическое

упрочнение материала на участках циклического деформирования, третье – циклическое упрочнение материала при ползучести, четвертое – изменение радиуса поверхности пластического нагружения при изменении температуры. Уравнения (5)–(7) описывают изменение изотропного упрочнения в зависимости от параметра непропорциональности нагружения A .

Постулируем, что скорость изменения тензора микронапряжений $\dot{\rho}_{ij}$ принимается в виде:

$$\dot{\rho}_{ij} = \dot{\rho}_{ij}^{pl} + \dot{\rho}_{ij}^c, \quad (10)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^{pl} = f(\chi)(\dot{\rho}_{ij}^m + \dot{\rho}_{ij}^p + \dot{\rho}_{ij}^r), \quad \rho_{ij} = \int_0^t \dot{\rho}_{ij} dt, \quad (11)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^m = g_1^m \dot{e}_{ij}^p - g_2^m \rho_{ij}^m \dot{\chi} + g_T^m \rho_{ij}^m \langle \dot{T} \rangle, \quad (12)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^p = g_1^p \dot{e}_{ij}^p - g_2^p \rho_{ij}^p \dot{\chi} + g_T^p \rho_{ij}^p \langle \dot{T} \rangle, \quad (13)$$

$$\dot{\rho}_{ij}^r = g_1^r \dot{e}_{ij}^p - g_2^r ((\rho_{\min} - \rho_u^r) / \rho_u^r) \rho_{ij}^r \dot{\chi} \cos \gamma + g_T^r \rho_{ij}^r \langle \dot{T} \rangle, \quad (14)$$

$$D = \dot{\rho}_{ij} \rho_{ij}^r / ((\dot{\rho}_{ij} \dot{\rho}_{ij})^{1/2} (\rho_{ij}^r \rho_{ij}^r)^{1/2}), \quad \cos \gamma = \begin{cases} |D| & \text{при } D < 0, \\ 0 & \text{при } D > 0, \end{cases} \quad \rho_u^r = (\rho_{ij}^r \rho_{ij}^r)^{1/2},$$

$$g_T^{m,p,r} = \frac{1}{g_1^{m,p,r}} \left[\frac{\partial g_1^{m,p,r}}{\partial T} \right],$$

$$f(\chi) = f(\chi_p^{mon}) + f(\chi_p^{cyc}) + f(\chi_\xi), \quad (15)$$

$$f(\chi_{m,c,\xi}) = 1 + k_1^{m,c,\xi} (1 - \exp(-k_2^{m,c,\xi} \chi_{m,c,\xi})), \quad (16)$$

$$\dot{\chi} = \dot{\chi}_p + \dot{\chi}_c,$$

где $g_1^{m,p,r}$, $g_2^{m,p,r}$, $k_1^{m,c,\xi}$, $k_2^{m,c,\xi}$ – материальные параметры, определяемые экспериментальным путем.

Здесь и далее для любой величины B , заключенной в угловые скобки, выполняется условие:

$$\langle B \rangle = \begin{cases} B & \text{при } B > 0, \\ 0 & \text{при } B \leq 0. \end{cases}$$

В (11) первый член, указанный в скобках, описывает эволюцию ρ_{ij}^{pl} , связанную с образованием и эволюцией микропластических деформаций, второй – макропластических деформаций, а третий – эволюцию при односторонне накапливаемых пластических деформациях ξ_{ij} . Зависимость (11) позволяет описывать основные эффекты анизотропии, вызванной неупругим деформированием материала при знакопеременном нагружении, а также эффекты, возникающие при реализации жестких и мягких режимов циклического нагружения.

Функция $f(\chi)$ учитывает изменение ρ_{ij}^{pl} при циклических блочных несимметричных режимах пластического нагружения.

Компоненты тензора скоростей пластических деформаций \dot{e}_{ij}^p определяются на основе ассоциированного закона течения:

$$\dot{e}_{ij}^p = \lambda_p S_{ij}.$$

Если величина напряжений, температура и скорость нагружения таковы, что

эффекты ползучести существенны, параметры процесса деформирования материала должны определиться на этапе нагружения с учетом взаимного влияния процессов ползучести и пластичности.

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 [22]:

$$F_c^{(i)} = S_{ij}^c S_{ij}^c - C_c^2 = 0, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

Согласно ассоциированному закону

$$\dot{e}_{ij}^c = \lambda_c \frac{\partial F_c^{(i)}}{\partial S_{ij}^c} = \lambda_c S_{ij}^c = 0, \quad (18)$$

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

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

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

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

С учетом взаимного влияния процессов пластичности и ползучести постулируем, что

$$\begin{aligned} \bar{C}_c &= \bar{C}_c(\chi_c, T) + C_c^{cyc}(\chi_c^{cyc}, T), \\ \dot{C}_c^{cyc} &= a_c(Q_c^p - C_c^{cyc})\dot{\chi}_c^{cyc}, \\ Q_c^p &= Q_2^{cr} A + (1 - A)Q_1^c, \\ \dot{\chi}_c &= \left(\frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^c, \dot{e}_{ij}^c \right)^{1/2}; \quad \chi_c^c = \int_0^t \dot{\chi}_c^c dt, \\ \dot{\chi}_c^{mon} &= \begin{cases} 0 & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^c \dot{e}_{ij}^c \leq 0, \\ \dot{\chi}_c & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^c \dot{e}_{ij}^c \geq 0, \end{cases} \quad \dot{\chi}_c^{cyc} = \begin{cases} \dot{\chi}_c & \text{при } a_e < 0 \vee e_{ij}^c \dot{e}_{ij}^c \leq 0, \\ 0 & \text{при } a_e = 0 \wedge e_{ij}^c \dot{e}_{ij}^c \geq 0, \end{cases} \\ \lambda_c &= \lambda_c(\psi_c, T), \quad \psi_c = \left[\frac{(S_{ij}^c S_{ij}^c)^{1/2} - \bar{C}_c}{C_c} \right], \\ \lambda_c &= \begin{cases} 0, & \psi_c \leq 0, \\ \lambda_c, & \psi_c > 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

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

Эволюционное уравнение для изменения координат центра поверхности ползучести примем в виде [22]:

$$\dot{\rho}_{ij}^c = g_1^c \dot{e}_{ij}^c - g_2^c \rho_{ij}^c \dot{\chi}_c + g_T^c \rho_{ij}^c \langle \dot{T} \rangle,$$

где g_1^c , g_2^c и g_T^c – экспериментально определяемые материальные параметры.

Конкретизируя соотношение (18), закон градиентальности можно представить в виде:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \lambda_c(\psi_c, T) S_{ij}^c = \lambda_c \psi_c S_{ij}^c = \lambda_c \left(\frac{\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c}{C_c} \right) S_{ij}^c.$$

Интенсивность тензора скорости деформации ползучести имеет вид:

$$\dot{\epsilon}_u^c = \lambda_c \left(\frac{\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c}{C_c} \right) S_u^c. \quad (20)$$

С учетом (20) выражение для длины траектории деформаций ползучести примет вид:

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

откуда

$$\lambda_c = \frac{\dot{\chi}_c}{\sqrt{2/3} \left(\sqrt{S_{ij}^c S_{ij}^c} - \bar{C}_c \right)}. \quad (21)$$

Зависимость χ_c от времени процесса t при $S_u^c = \text{const}$ при многоосном деформировании по лучевой траектории имеет вид, представленный на рис. 1.

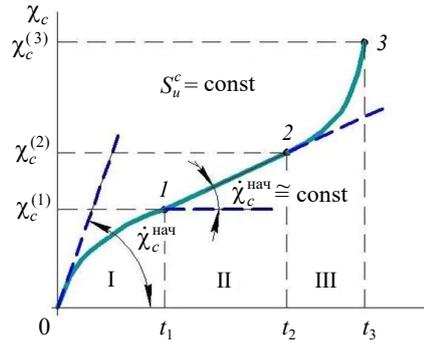


Рис. 1

На кривой $\chi_c(t)$ с определенной долей условности можно выделить три участка:

I – участок неустановившейся ползучести ($0 - \chi_c^{(1)}$) – скорость деформации ползучести $\dot{\chi}_c$ убывает;

II – участок установившейся ползучести ($\chi_c^{(1)} - \chi_c^{(2)}$) – скорость деформации ползучести $\dot{\chi}_c$ приблизительно постоянна, $\dot{\chi}_c \cong \text{const}$;

III – участок неустановившейся ползучести ($\chi_c > \chi_c^{(2)}$) – деформации ползучести быстро растут (предшествует разрушению) и $\dot{\chi}_c$ резко возрастает.

Длины участков существенным образом зависят от величины $S_u^c = \text{const}$.

Уравнения (18)–(21) описывают неустановившиеся и установившиеся участки кривой ползучести при разных уровнях напряжений и основные эффекты процесса ползучести при знакопеременном напряжении. Связь уравнений ползучести (18)–(21) с уравнениями (1)–(17), описывающими «мгновенные» пластические деформации, осуществляется на этапе нагружения через девиатор напряжений σ'_{ij} и соответствующий алгоритм определения $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ и $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ на этапе нагружения путем определенных соотношений между «временными» и «мгновенными» скалярными и тензорными величинами.

На стадии развития рассеянных по объему повреждений наблюдается влияние поврежденности на физико-механические характеристики материала. Это влияние может быть учтено введением эффективных напряжений [17, 18]:

$$\tilde{\sigma}_{ij} = F_1(\omega)\sigma'_{ij} = \frac{G}{\tilde{G}}\sigma'_{ij} = \frac{\sigma'_{ij}}{(1-\omega)[1-\omega(6K+12G)/(9K+8G)]}, \quad (22)$$

$$\tilde{\sigma} = F_2(\omega)\sigma = \frac{K}{\tilde{K}}\sigma = \frac{\sigma}{4G(1-\omega)/(4G+3K\omega)}, \quad (23)$$

где \tilde{G} , \tilde{K} – эффективные модули упругости, определяемые по формулам Маккензи [24].

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

$$\tilde{\rho}_{ij}^i = F_1(\omega)\rho_{ij}^i.$$

1.2. Эволюционные уравнения накопления повреждений

Уравнения накопления повреждений базируются на связи величины поврежденности с внутренними макроскопическими параметрами, которые могут быть определены экспериментально. Зависимость рассеянной энергии, затраченной на образование дефектов при усталостном нагружении, определяется через работу тензора микронапряжений $\tilde{\rho}_{ij}$ на неупругих деформациях \dot{e}_{ij}^H :

$$W = \tilde{\rho}_{ij}\dot{e}_{ij}^H. \quad (24)$$

Ресурсные характеристики при усталости определяются с использованием подхода [25], основанного на энергетическом критерии, который записывается выражением:

$$\sum_{i=1}^{N_p} \left[\Delta W_i - \Delta W_R \left(\frac{\Delta W_i}{\Delta W_R} \right)^\alpha \right] = \Delta W_o = \text{const}, \quad (25)$$

где ΔW_o – «опасная» часть энергии повреждения за цикл нагружения, коррелирующая с энергией, затраченной на образование микродефектов; ΔW_i – полная энергия за цикл нагружения; ΔW_R – энергия за цикл нагружения при напряжении, равном пределу выносливости σ_R .

Выражение для «опасной» энергии записывается в виде:

$$W_o = W[1 - f(\gamma)]. \quad (26)$$

Функция $f(\gamma)$ учитывает величину «неопасной» энергии, затраченной на пластическое деформирование, и зависит от параметра $\gamma = \sigma_u/C_p$, характеризующего относительный уровень действующих максимальных напряжений:

$$f(\gamma) = \begin{cases} 1 & \text{при } \gamma < \gamma_*, \\ 1 - \left(\frac{\gamma - \gamma_*}{1 - \gamma_*} \right)^n & \text{при } \gamma_* \leq \gamma \leq 1, \\ 0 & \text{при } \gamma > 1. \end{cases} \quad (27)$$

В задачах оценки ресурсных характеристик необходимо учитывать влияние многоосности нагружения, наличие которой существенным образом снижает ресурс как за счет увеличения действующих компонент тензора деформаций и напряжений при пропорциональном нагружении, так и за счет вращения главных площадок тензоров напряжений и деформаций при непропорциональном нагружении.

Многочисленные исследования влияния многоосности нагружения при различных видах напряженных состояний, таких как двухосное растяжение-сжатие, трехосное растяжение и др., позволяют сделать вывод, что на ресурс оказывает существенное влияние «объемность» напряженного состояния $\beta = \sigma/\sigma_u$, где σ – гидростатическая компонента тензора напряжений, σ_u – интенсивность тензора напряжений.

Учет влияния «объемности» напряженного состояния на скорость роста поврежденности $\dot{\omega}$ производится за счет введения в уравнение скорости накопления повреждений функции $f_1(\beta)$, которая увеличивает скорость накопления повреждений $\dot{\omega}$ при нагружениях с $\beta \rightarrow \infty$ и уменьшает при $\beta \rightarrow -\infty$. При нагружениях с $\beta \rightarrow -\infty$ в некоторых поликристаллических металлах и сплавах возможно частичное уменьшение накопленной поврежденности (эффект «залечивания»). При нагружениях с $\beta = 0$ (чистый сдвиг) функция $f_1(\beta) = 1$.

В условиях непропорционального нагружения, при котором направляющие тензоры напряжений и деформаций не соосны, реализуемая траектория деформирования существенным образом влияет на кинетику НДС и на ресурсные характеристики конструкционного материала.

Учитывая рассмотренные эффекты, влияющие на ресурсные характеристики, уравнение для скорости накопления усталостных повреждений в условиях малоциклового и многоциклового нагружения можно представить в виде:

$$\dot{\omega} = f_1(\beta)f_2(\omega)f_3(W_o)f_4(\theta)\dot{W}_o. \quad (28)$$

В (28) введены следующие обозначения для функций:

$f_1(\beta)$ – учет влияния «объемности» напряженного состояния;

$f_2(\omega)$ – учет влияния накопленного уровня поврежденности на скорость накопления повреждений;

$f_3(W_o)$ – учет текущего относительного уровня рассеянной энергии, идущей на образование микродефектов;

$f_4(\theta)$ – учет изменения скорости накопления повреждений при изломе траектории деформирования;

$$\begin{aligned} f_1(\beta) &= \exp(k\beta), \\ f_2(\omega) &= \begin{cases} 0 & \text{при } W_o \leq W_a, \\ c\omega^{-1/3}(1-\omega)^{-2/3} & \text{при } W_o > W_a, \end{cases} \\ f_3(W_o) &= \frac{W_o - W_a}{W_f - W_a}, \\ f_4(\theta) &= (1 - \cos^2 \theta)\beta + \cos^2 \theta, \end{aligned} \quad (29)$$

где c, W_a – параметры материала;

$$W_f = W_{pf}^{cyc} \frac{\dot{\chi}_p^{cyc}}{\dot{\chi}} + W_{cf}^{cyc} \frac{\dot{\chi}_c^{cyc}}{\dot{\chi}} + W_{pf}^{mon} \frac{\dot{\chi}_p^{mon}}{\dot{\chi}} + W_{cf}^{mon} \frac{\dot{\chi}_c^{mon}}{\dot{\chi}}, \quad (30)$$

где $W_{pf}^{cyc}(T), W_{pf}^{mon}(T), W_{cf}^{cyc}(T), W_{cf}^{mon}(T)$ – параметры материала.

В качестве критерия разрушения принято условие достижения величиной поврежденности ω критического значения:

$$\omega = \omega_f \leq 1. \quad (31)$$

2. Численные результаты

Для оценки степени достоверности и определения границ применимости модели МПС в условиях совместного действия процессов ползучести и усталости, а также точности определения материальных параметров и скалярных функций была решена задача расчета кинетики НДС и накопления повреждений в лабораторных образцах из стали 316 при жестком одноосном нагружении – растяжении-сжатии с временными выдержками на максимальной деформации и без них для двух амплитуд деформаций [7]. Температура в опытах составляла 650 °С. На рис. 2 приведены законы нагружения, реализуемые в испытаниях.

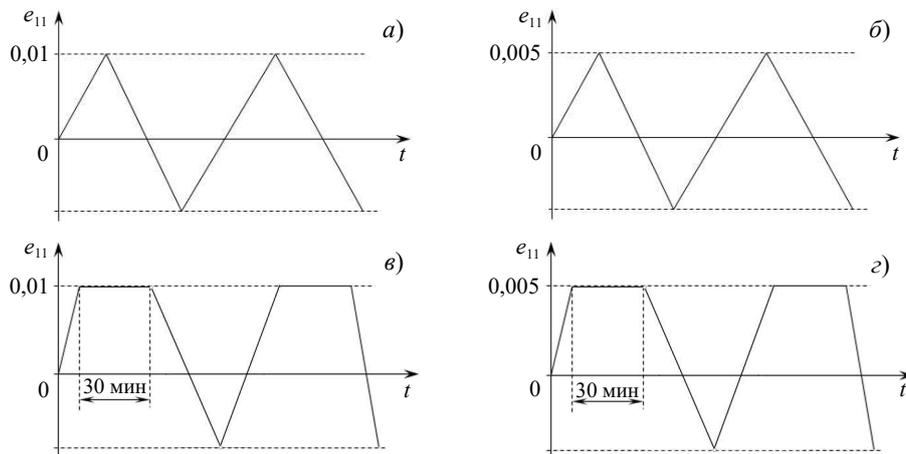


Рис. 2

Физико-механические характеристики стали 316 [7] и материальные параметры модели МПС при температуре 650 °С [7–23] приведены в таблицах 1–4.

Таблица 1

**Физико-механические характеристики
и материальные параметры модели МПС стали 316**

K , МПа	153450	a_p	3,2
G , МПа	58450	a_c	75
C_p^0 , МПа	74	W_{pf}^{cyc} , МДж/м ³	820
g_1^p , МПа	6858	W_{cf}^{cyc} , МДж/м ³	10
g_1^p	290,4	W_{cf}^{mon} , МДж/м ³	50
g_1^c , МПа	5100	W_{pf}^{mon} , МДж/м ³	10
g_2^c	260		

Таблица 2

Радиус поверхности нагружения при нулевой скорости ползучести \bar{C}_c стали 316

χ_c	0	0,01	0,05	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,17
\bar{C}_c , МПа	40	40	40	35	27	14	6	3	2

Таблица 3

Модуль циклического упрочнения стали 316

a_{emax}	0	0,001	0,003	0,004	0,006	0,01
$Q_1^p(a_{emax})$, МПа	0	50	80	90	95	110
$Q_1^c(a_{emax})$, МПа	0	-30	-33	-33	-33	-33

**Зависимость коэффициентов пропорциональности
от интенсивности напряжения σ_u для стали 316**

σ_u , МПа	0	50	100	150	170	200
λ_c^0 , 1/(МПа·час)	0	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$
λ_c^{II} , 1/(МПа·час)	0	$1,455 \cdot 10^{-6}$	$1,455 \cdot 10^{-6}$	$1,455 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$1,854 \cdot 10^{-5}$

На рис. 3–5 приведено сравнение кривых ползучести для стали 316 при уровнях напряжений σ_{11} , равных 183, 207 и 241 МПа соответственно, и температуре 650 °С, полученных экспериментально (кружочки) и методом численного моделирования экспериментальных процессов (сплошная линия).

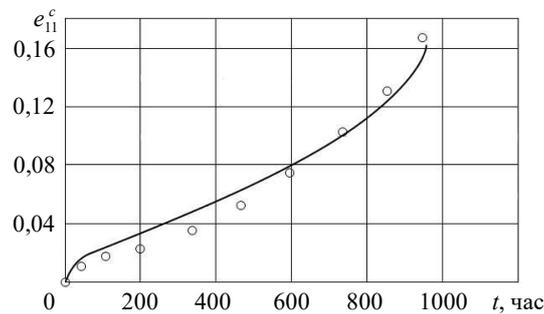


Рис. 3

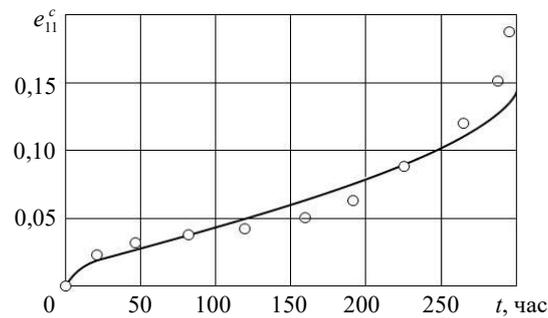


Рис. 4

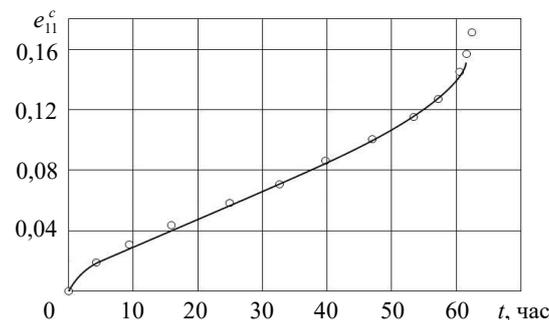


Рис. 5

На рис. 6 приведено сравнение экспериментальных данных (светлые кружочки) с результатами численного моделирования экспериментальных процессов (черные точки) для кривой длительной прочности.

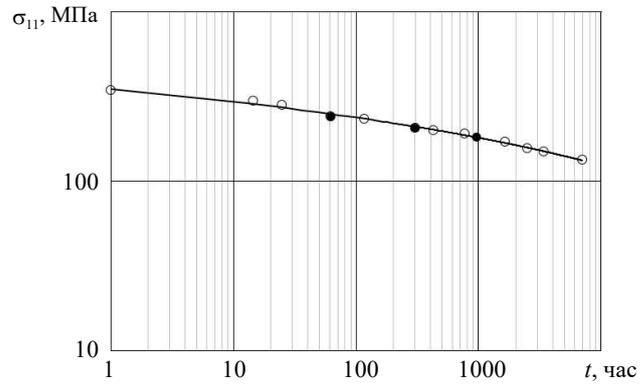


Рис. 6

На рис. 7 приведены диаграммы деформирования для законов нагружения *a)* и *в)* (см. рис. 2).

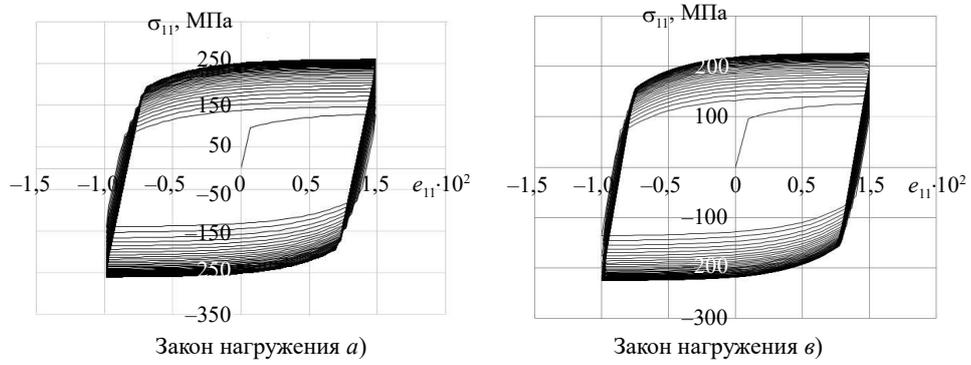


Рис. 7

На рис. 8, 9 приведено сравнение зависимостей величины размахов напряжений, полученных экспериментально (маркеры) и расчетным путем (сплошные линии), от количества циклов N .

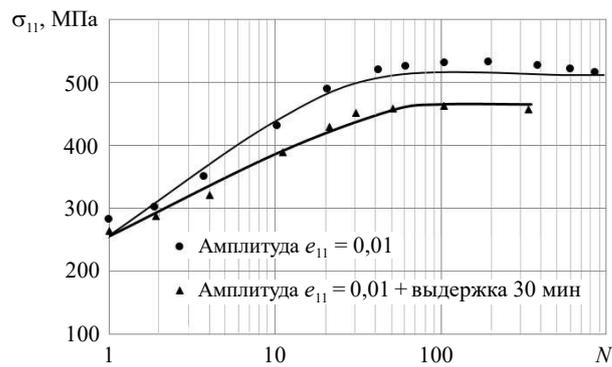


Рис. 8

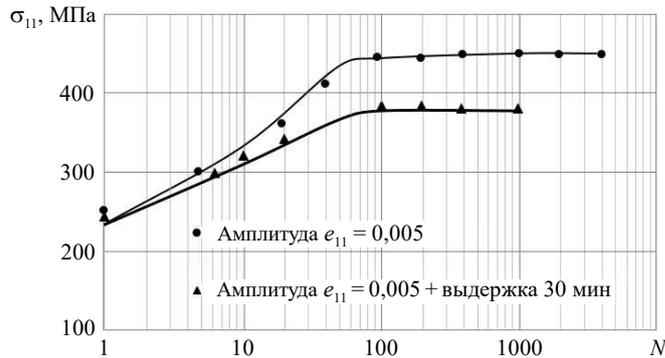


Рис. 9

На рис. 10 приведено сравнение кривых релаксации напряжений в цикле, полученных численным (сплошные линии) и экспериментальным путем (маркеры) для вышеуказанных условий разрушения.

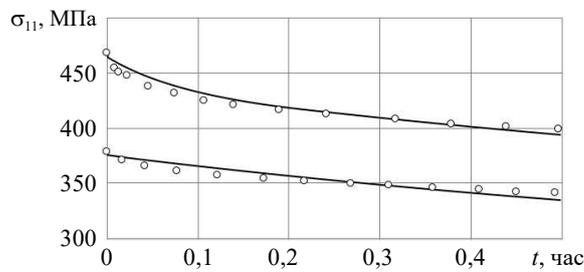


Рис. 10

На рис. 11 приведено сравнение отклонений результатов численного моделирования и экспериментальных данных от закона линейного суммирования повреждений (светлые кружочки – экспериментальные данные, черные – численные результаты). На рисунке обозначено: N_i – количество циклов, N_f – число циклов до разрушения, t_i – время выдержки, t_f – время до разрушения.

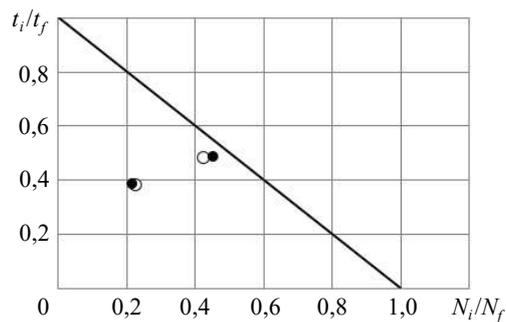


Рис. 11

Заключение

Развита математическая модель МПС, описывающая связанные процессы высокотемпературного термомеханического деформирования и деградации начальных прочностных свойств поликристаллических конструкционных сплавов, основанная на энергетическом подходе и единой форме представления процесса накопления

повреждений при деградиционных механизмах, сочетающих усталость и ползучесть материала.

Для математической модели МПС получены материальные параметры и скалярные функции аустенитной стали 316, входящие в определяющие соотношения математической модели МПС.

В рамках оценки достоверности и определения границ применимости развитой математической модели МПС проведены численные исследования определения кинетики НДС и накопления повреждений в лабораторных образцах из стали 316 при жестком циклическом нагружении – растяжении-сжатии с временными выдержками на максимальной деформации и без них для двух амплитуд деформаций. Численные результаты сопоставлялись с экспериментальными данными, что позволило сделать вывод о достаточной для инженерных расчетов точности описания процессов высокотемпературного термомеханического нагружения поликристаллического сплава.

Результаты оценки достоверности показали, что развитая модель с высокой степенью точности описывает процессы термомеханического нагружения поликристаллических конструкционных сплавов при деградиционных механизмах, сочетающих усталость и ползучесть.

Список литературы

1. Митенков А.М., Кайдалов В.Б., Коротких Ю.Г. и др. *Методы обоснования ресурса ЯЭУ*. М.: Машиностроение, 2007. 445 с.
2. Вудфорд Д.А. Повреждение при ползучести и концепция остаточной долговечности. *Труды Америк. об-ва инж.-мех. Теорет. основы инж. расчетов*. 1979. Т. 101. №4. С. 1–8.
3. Маджумар С., Мейя П. Механическая усталость, зависящая от времени. *Труды Америк. об-ва инж.-мех. Теорет. основы инж. расчетов*. 1980. Т. 102. №1. С. 111–121.
4. Гомюк, Бью Куок Т., Бирон А. Изучение поведения стали 316 при нагружениях по схемам усталости, ползучести и совместного действия усталости и ползучести. *Современное машиностроение*. 1991. №1. С. 14–23.
5. Гомюк, Бью Куок Т. Расчет долговечности коррозионностойкой стали 304 в условиях взаимодействия усталости и ползучести с использованием теории непрерывного повреждения. *Труды Америк. об-ва инж.-мех. Теорет. основы инж. расчетов*. 1986. Т. 108. №3. С. 111–136.
6. Замрик С., Дэвис Д. Применение метода исчерпания пластичности для усталости при одноосном нагружении – оценка повреждения при ползучести для нержавеющей стали 316. *Современное машиностроение. Сер. Б*. 1991. №8. С. 16–24.
7. Замрик С. Расчет повреждений, обусловленных взаимным влиянием ползучести и усталости нержавеющей стали 316 при осевом нагружении. *Современное машиностроение. Сер. Е*. 1990. №7.
8. Tianyu Zhang, Xiaowei Wang, Wei Zhang, Tasnim Hassan, Jianming Gong. Fatigue-creep interaction of P92 steel and modified constitutive modelling for simulation of the responses. *Metals*. 2020. Vol. 10. No 3. P. 307–318. DOI: 10.3390/met10030307.
9. Дульнев Р.А., Котов П.И. *Термическая усталость металлов*. М.: Машиностроение, 1980. 200 с.
10. Гусенков А.П., Котов П.И. *Малоцикловая усталость при неизотермическом нагружении*. М.: Машиностроение, 1983. 240 с.
11. Писаренко Г.С., Лебедев А.А., Матвеев В.В. и др. *Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях*. Киев: Наукова думка, 1980. 535 с.
12. Шестериков С.А., Аршакуни А.Л., Чередеева Л.Ю. Метод температурно-силового прогнозирования длительной прочности металлов. *Проблемы прочности*. 1989. №9. С. 6–9.
13. Бойл Дж., Спенс Дж. *Анализ напряжений в конструкциях при ползучести*. М.: Мир, 1986. 360 с.

14. Казанцев А.Г. Исследование взаимодействия малоциклового усталости и ползучести при неизотермическом нагружении. *Проблемы прочности*. 1985. №5. С. 25–31.
15. Бернард-Конноли М., Бью-Куок Т., Бирон А. Усталость коррозионностойкой стали 304 при испытаниях в условиях многоступенчатой контролируемой деформации. *Труды Амер. об-ва инж.-мех. Сер. Д. Теорет. основы инж. расчетов*. 1983. Т. 105. №3. С. 47–53.
16. Бью-Куок. Инженерный подход к анализу накопления повреждений в металлах в условиях ползучести. *Труды Амер. об-ва инж.-мех. Сер. Д. Теорет. основы инж. расчетов*. 1979. Т. 101. №4. С. 33–40.
17. Волков И.А., Коротких Ю.Г. *Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями*. М.: Физматлит, 2008. 424 с.
18. Волков И.А., Игумнов Л.А. *Введение в континуальную механику поврежденной среды*. М.: Физматлит, 2017. 304с.
19. Volkov I.A., Igumnov L.A., Shishulin D.N. Modeling plastic deformation and damage accumulation processes in structural steels under block non-symmetric low-cycle loading. *Materials Physics and Mechanics*. 2019. Vol. 42. Iss. 3. P. 359–366.
20. Igumnov L.A., Volkov I.A., Boev E.V. et al. A model of damaged media used for describing the process of non-stationary creep and long-term strength of polycrystalline structural alloys. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2022. Vol. 34. Iss. 3. P. 841–853. <https://doi.org/10.1007/s00161-022-01094-8>.
21. Митенков Ф.М., Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г. и др. *Прикладная теория пластичности*. М.: Физматлит, 2015. 284 с.
22. Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г. *Прикладная теория вязкопластичности*. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2015. 318 с.
23. Волков И.А., Игумнов Л.А., Тарасов И.С., Шишулин Д.Н., Пичков С.Н., Маркова М.Т. Моделирование пластического деформирования поликристаллических конструкционных сплавов при блочных несимметричных режимах мягкого малоциклового нагружения. *Проблемы прочности и пластичности*. 2019. Т. 81. №1. С. 63–76. DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-1-63-76.
24. Mac Kenzie J.K. The elastic constants of a solids containing spherical holes. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1950. Vol. 63. No 1. P. 2–11. DOI: 10.1088/0370-1301/63/1/302.
25. Трощенко В.Т. Рассеянные усталостные повреждения металлов и сплавов. Сообщение 3. Деформационные энергетические критерии. *Проблемы прочности*. 2006. № 1. С. 5–31.

References

1. Mitenkov F.M., Kaydalov V.B., Korotkikh Yu.G. et al. *Metody obosnovaniya resursaYaEU [Methods of Substantiating the Resource of Nuclear Power Plants]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 2007. 445 p. (In Russian).
2. Woodford D.A. Creep damage and the remaining life concept. *Journal of Engineering Materials and Technology – ASME*. 1979. Vol. 101. No 4. P. 311–316.
3. Majumder S., Maiya P.S. Mekhanicheskaya ustalost, zavisyashchaya ot vremeni [Time-dependent mechanical fatigue]. *Trudy Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov [Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. Series D]*. 1980. Vol. 102. No 1. P. 111–121 (In Russian).
4. Gomyuk, Beau-Quoc T., Biron A. Izuchenie povedeniya stali 316 pri nagruzheniyakh po skhemam ustalosti, polzuchesti i sovmestnogo deystviya ustalosti i polzuchesti [The behavior of 316 during loading schemes fatigue and joint of creep]. *Sovremennoe mashinovedenie [Modern Machines]*. 1991. No 1. P. 14–23 (In Russian).
5. Gomyuk, Beau-Quoc T. Raschet dolgovechnosti korrozionnostoykoy stali 304 v usloviyakh vzaimodeystviya ustalosti i polzuchesti s ispolzovaniem teorii nepreryvnogo povrezhdeniya [Calculation durability stainless steel 304 in interaction of fatigue and creep by using the theory of continuous damage]. *Trudy Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Seriya Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov [Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. Series D]*. 1986. Vol. 108. No 3. P. 111–136 (In Russian).
6. Zamrik S.Y., Davis D.C. A ductility exhaustion approach for axial fatigue – creep damage

assessment using type 316 stainless steel. *Journal of Pressure Vessel Technology. Transactions of the ASME*. 1991. Vol. 113. Iss. 2. P. 180–186. DOI: 10.1115/1.2928745.

7. Zamrik S.Y. An interpretation of axial creep-fatigue damage interaction in type 316 stainless steel. *Journal of Pressure Vessel Technology. Transactions of the ASME*. 1990. Vol. 112. Iss. 1. P. 4–19. <https://doi.org/10.1115/1.2928580>.

8. Tianyu Zhang, Xiaowei Wang, Wei Zhang, Tasnim Hassan, Jianming Gong. Fatigue-creep interaction of P92 steel and modified constitutive modelling for simulation of the responses. *Metals*. 2020. Vol. 10. No 3. P. 307–318. DOI: 10.3390/met10030307.

9. Dulnev R.A., Kotov P.I. *Termicheskaya ustalost metallov [Thermal Fatigue of Metals]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1980. 200 p. (In Russian).

10. Gusenkov A.P., Kotov P.I. *Malotsiklovaya ustalost pri neizotermicheskom nagruzhenii [Low-Cycle Fatigue under Nonisothermal Loading]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1983. 240 p. (In Russian).

11. Pisarenko G.S., Lebedev A.A., Matveev V.V. et al. *Prochnost materialov i elementov konstruktivnykh v ekstremalnykh usloviyakh [Strength of Materials and Structural Elements under Extreme Conditions]*. Kiev. Naukova dumka Publ. 1980. 535 p. (In Russian).

12. Shesterikov S.A., Arshakuni A.L., Cheredeeva L.Yu. Metod temperaturno-silovogo prognozirovaniya dlitelnoy prochnosti metallov [Method for Temperature-Force Prediction of the Long-Term Strength of Metals]. *Problemy prochnosti [Strength of Materials]*. 1989. No 9. P. 6–9 (In Russian).

13. Boyle J.T., Spence J. *Stress Analysis for Creep*. London. Waltham. Butterworth-Heinemann Ltd. Publ. 1983. 296 p.

14. Kazantsev A.G. Issledovanie vzaimodeystviya malotsiklovoy ustalosti i polzuchesti pri neizotermicheskom nagruzhenii [Investigation of the interaction of low-cycle fatigue and creep under nonisothermal loading]. *Problemy prochnosti [Strength of Materials]*. 1985. No 5. P. 25–31 (in Russian).

15. Bernard-Connolly M., Beau-Quoc T., Biron A. Multilevel strain controlled fatigue on a type 304 stainless steel. *Journal of Engineering Materials and Technology. Transactions of the ASME*. 1983. Vol. 105. No 3. P. 188–194. DOI: 10.1115/1.3225642.

16. Beau-Quoc T. An engineering approach for cumulative damage in metals under creep loading. *Journal of Engineering Materials and Technology. Transactions of the ASME*. 1979. Vol. 101. No 4. P. 337–343. <https://doi.org/10.1115/1.3443699>.

17. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. *Urvneniya sostoyaniya vyazkouprugoplasticheskikh sred spovrezhdeniyami [Equations of State of Viscoelastic Plastic Media with Damage]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 424 p. (In Russian).

18. 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).

19. Volkov I.A., Igumnov L.A., Shishulin D.N. Modeling plastic deformation and damage accumulation processes in structural steels under block non-symmetric low-cycle loading. *Mater. Phys. Mech.* 2019. Vol. 42. Iss. 3. P. 359–366.

20. Igumnov L.A., Volkov I.A., Boev E.V. et al. A model of damaged media used for describing the process of non-stationary creep and long-term strength of polycrystalline structural alloys. *Contin. Mech. Thermodyn.* 2022. Vol. 34. Iss. 3. P. 841–853. <https://doi.org/10.1007/s00161-022-01094-8>.

21. Mitenkov F.M., Volkov I.A., Igumnov L.A. et al. *Prikladnaya teoriya plastichnosti [Applied Theory of Plasticity]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2015. 284 p. (In Russian).

22. 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).

23. Volkov I.A., Igumnov L.A., Tarasov I.S., Shishulin D.N., Pichkov S.N., Markova M.T. Modelirovaniye plasticheskogo deformirovaniya polikristallicheskih konstruktivnykh splavov pri blochnykh nesimmetrichnykh rezhimakh myagkogo malotsiklovogo nagruzheniya [Modeling plastic deformation of polychrystalline structural alloys under block-type nonsymmetrical regimes of soft low-cycle loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2019. Vol. 81. No 1. P. 63–76 (In Russian).

24. Mac Kenzie J.K. The elastic constants of a solids containing spherical holes. *Proc. Phys. Soc. B.* 1950. Vol. 63. No 1. P. 2–11. DOI: 10.1088/0370-1301/63/1/302.
25. Troshchenko V.T. Nonlocalized fatigue damage of metals and alloys. Part 3. Strain and energy criteria. *Strength of Materials.* 2006. Vol. 38. Iss. 1. P. 1–19.

**EVALUATION OF RESOURCE CHARACTERISTICS OF POLYCRYSTALLINE
STRUCTURAL ALLOYS DURING DEGRADATION BY JOINT MECHANISMS
OF FATIGUE AND CREEP OF THE MATERIAL**

Volkov I.A.^{1,2}, Igumnov L.A.¹, Shishulin D.N.¹, Yakovlev S.G.²

¹*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

²*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

The problem of assessing the resource characteristics of responsible engineering facilities, taking into account the peculiarities of operational loading conditions, is discussed. The processes of degradation of the initial strength properties of structural materials (metals and their alloys) under combined fatigue and long-term strength mechanism are considered.

A mathematical model describing the processes of cyclic viscoplastic deformation and accumulation of fatigue damage in structural alloys under multiaxial disproportionate modes of combined thermomechanical loading has been developed from the modern positions of mechanics of the damaged medium and fracture mechanics. The model consists of three interrelated components: relations determining the cyclic viscoplastic behavior of the material, taking into account the dependence on the destruction process; evolutionary equations describing the kinetics of the damage accumulation process; criteria for the strength of the damaged material.

The variant of the cyclic determining relations is based on the idea of the existence of plasticity and creep surfaces in the stress space and the principle of gradiency of the velocity vectors of plastic deformations and creep deformations to the corresponding surface at the loading point. These equations of state reflect the main effects of the process of cyclic viscoplastic deformation of the material for arbitrary complex loading trajectories.

The variant of kinetic equations of damage accumulation is based on introduction of a scalar damage parameter and on energy principles. It takes into account the main effects of formation, growth and fusion of microdefects under arbitrary complex modes of combined thermomechanical loading. A joint form of the evolutionary equation of damage accumulation in the areas of low-cycle fatigue and long-term strength is proposed.

As a criterion of the strength of the damaged material, the condition of reaching the critical value of the damage value is used.

The results of numerical modeling of deformation processes and damage accumulation in structural alloys with degradation mechanisms combining fatigue and long-term strength of the material are presented. The results of the comparison of calculated and experimental data showed that the proposed model of the mechanics of the damaged medium qualitatively and with the accuracy necessary for practical calculations quantitatively describes the processes of destruction of hazardous areas of structural elements under the combined actions of degradation mechanisms of fatigue and long-term strength.

Keywords: low-cycle fatigue, multi-cycle fatigue, long-term strength, mathematical modeling, mechanics of the damaged medium, stress-strain state, material parameters, basic and full-scale experiments, damage, resource.