

УДК 539.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУММИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ДЕГРАДАЦИИ МАТЕРИАЛА ПО МЕХАНИЗМАМ УСТАЛОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ

© И.А. Волков, А.И. Волков, М.А. Гусева, А.А. Емельянов, И.С. Тарасов

*Волжская государственная академия водного транспорта, Нижний Новгород, Россия*

[pmptmvgavt@yandex.ru](mailto:pmptmvgavt@yandex.ru)

Проведён анализ основных подходов, описывающих процесс суммирования повреждений при усталости и ползучести. Предложена модель суммирования повреждений и рассмотрен механизм работы данной модели.

Методом численного моделирования на ПЭВМ и сравнения полученных результатов с опытными данными показана достоверность модели суммирования повреждений при усталости и ползучести при различных режимах нагружения.

Ключевые слова: моделирование, напряжение, деформация, пластичность, ползучесть, малоцикловая усталость, длительная прочность, суммирование повреждений, лабораторный образец, эксперимент.

### 1. Введение.

Особенностью работы элементов конструкций, разрушающихся в результате малоцикловой усталости (МЦУ), является нестационарность теплового и силового нагружения, которая определяет в местах концентрации напряжений циклический характер процесса вязкопластического деформирования материала, сопровождающийся выдержками различной длительности при различных уровнях напряжений и температуры [1]. Указанный циклический характер вязкопластической деформации приводит к интенсивному накоплению повреждений, обусловленный зарождением, ростом и слиянием микродефектов, приводящих материал к разрушению за ограниченное  $\sim 10^2 - 10^4$  число циклов. Основными факторами, влияющими на процесс накопления повреждений, являются: история процесса вязкопластического деформирования (форма цикла, вид траектории деформирования), история изменения температуры  $T$  (форма температурного цикла, максимальная температура цикла  $T_{\max}$ ), время нагружения (время цикла, время выдержки). Экспериментальные данные по исследованию малоцикловой неизотермической усталости [2] свидетельствуют, что при термоциклическом нагружении циклами различной длительности наблюдается различный характер разрушения вследствие различной комбинации двух основных процессов повреждаемости: процесса повреждаемости, вызванного ползучестью материала и развивающегося в основном по границам зерен (межкристаллитное разрушение), и процесса повреждаемости, вызванного упругопластической деформацией (транскристаллитное разрушение). В циклах с длительными выдержками при высоких температурах и больших амплитудных значениях напряжений основное значение имеет разрушение первого типа. При пилообразных циклах высокой частоты прочность материала определяется его сопротивлением малоцикловому разрушению (второй тип разрушения). В промежуточной области нагружения на прочность материала влияют оба механизма повреждения материала [2].

Изменение температуры сказывается на изменении статических и циклических свойств материалов и, следовательно, на кинетике вязкопластического деформирования и разрушения. При уровнях температур, когда фактор времени проявляется несущественно (при незначительных деформациях ползучести), повреждающее действие теплово-

го воздействия существенно зависит от физико-механических свойств материала и наличия термических напряжений. При более высоких температурах, когда становятся существенными реологические эффекты, влияние высокой температуры дополнительно проявляется через повреждающее действие высокотемпературной ползучести. При этом, повреждающее действие неизоотермического деформационного цикла, с амплитудными значениями  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$ , как правило, выше аналогичного деформационного цикла при постоянной температуре равной  $(T_{\min} + T_{\max})/2$ . Выдержка в условиях ползучести до заданного уровня деформаций при более высокой температуре приводит к большему повреждению, чем выдержка при меньшей температуре.

Влияние различных факторов на процесс накопления повреждений: формы цикла нагружения, вида траектории деформирования, частоты цикла, времени выдержки, формы температурного цикла, амплитудных значений температуры и нагрузки проявляется через их влияние на интенсификацию или торможение процессов накопления повреждений.

Систематические и многочисленные исследования закона линейного суммирования повреждений показали, что в общем случае при переменных нагрузках и температуре применение этого закона может привести к большим отклонениям, как в сторону завышения, так и в сторону занижения расчетных значений долговечности.

При описании процессов накопления повреждений и разрушения в рамках механики сплошных сред (до образования макротрещины) вводят некоторую априорную макроскопическую меру поврежденности [3–6]. В общем случае эта мера поврежденности должна характеризоваться некоторым тензором второго или более высокого ранга [5, 7], функционально зависящим от истории процесса деформирования и температуры. Однако, ввиду отсутствия в настоящее время необходимой экспериментальной информации в качестве меры повреждаемости выбирают некоторый скалярный параметр  $\omega$ , характеризующий на макроуровне степень поврежденности материала:

$$\omega_0 \leq \omega \leq \omega_f. \quad (1)$$

Наглядной физической интерпретацией меры поврежденности материала  $\omega$  является относительная объемная доля дефектов в элементарном эталонном объеме материала:

$$\omega = V/V_f, \quad (2)$$

где  $V$  – текущая объемная доля микродефектов,  $V_f$  – критическая объемная доля соответствующая образованию в данном объеме материала макроскопической трещины (полной потери несущей способности материала в данном элементарном объеме);  $\omega = \omega_0 \approx 0$  соответствует неповрежденному материалу, а  $\omega = \omega_f \leq 1$  – моменту образования макротрещины ( $\sim 0,1$  см).

Соответствующие кинетические уравнения, описывающие скорость изменения  $\omega$  формулируют на базе макроопытов по разрушению лабораторных образцов и сравнении следствий теории с экспериментальными данными.

При формулировке эволюционных уравнений накопления повреждений важной является проблема взаимодействия процессов повреждаемости вследствие процесса ползучести и процесса пластической деформации. Наиболее распространенным подходом является линейное суммирование:

$$\omega = \omega_c + \omega_p. \quad (3)$$

где  $\omega_c$  – мера поврежденности при ползучести, а  $\omega_p$  – при МЦУ.

Однако этот подход справедлив лишь в случаях отсутствия взаимодействия рассматриваемых процессов повреждаемости (или их слабого взаимодействия) [2, 8–10]. В настоящее время вопрос о взаимодействии процессов повреждаемости при пластичности и ползучести является малоизученным. Имеющиеся данные позволяют высказать соображение о сильном взаимодействии указанных процессов при температурах, превышаю-

щих половину абсолютной температуры плавления  $T_{пл}$  сплава [10], и о слабом взаимодействии при меньших температурах. С другой стороны, процессы поврежденности при ползучести и пластичности должны взаимодействовать на заключительных стадиях процесса накопления повреждений, т.е. необходим некоторый критический уровень поврежденности для того, чтобы эти два четко различающихся механизма разрушения стали взаимно зависимыми и взаимно усиливающими [8]. Экспериментальные данные свидетельствуют, что обычно материал, подверженный длительному статическому нагружению, оказывается менее прочным при усталостном нагружении, чем исходный, и наоборот. Однако это справедливо не во всех случаях. Если процесс длительного статического нагружения производится при таких режимах, которые способствуют повышению равновесности структуры (доставиванию), то может наблюдаться и обратная картина. Неизотермическое циклическое погружение, по сравнению с изотермической усталостью, имеет ряд особенностей, усиливающих взаимное влияние процессов статического и циклического повреждений [2]. В работе [11] для случая неизотермического нагружения предлагается степенной закон суммирования  $\omega_c$  и  $\omega_p$ :

$$(\omega_p)^{n_p} + (\omega_c)^{n_c} = 1. \quad (4)$$

где  $n_p, n_c < 1$  – материальные параметры, зависящие от температуры:

$$n_p = 1/8 \dots 1; \quad n_c = 1/4 \dots 1. \quad (5)$$

В [2] для ряда конструкционных материалов показана справедливость закона (4) в достаточно широком интервале температур, причем диапазон изменения  $n_p$  и  $n_c$  определялся (5).

Другой возможной формой суммирования повреждений от процессов ползучести и пластичности является закон:

$$\dot{\omega} = f_1(\dot{\omega}_p, \dot{\omega}_c). \quad (6)$$

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}_p^{n_p} + \dot{\omega}_c^{n_c}. \quad (7)$$

либо

$$\dot{\omega} = n_p \dot{\omega}_p + n_c \dot{\omega}_c. \quad (8)$$

$$n_p = n_p(T, \omega_c, \omega_p); \quad n_c = n_c(T, \omega_c, \omega_p) \quad (9)$$

$$0 \leq n_p \leq 1; \quad 0 \leq n_c \leq 1$$

При  $n_p = n_c = 1$  имеем закон линейного суммирования повреждений (3).

## 2. Модель суммирования повреждений.

Следуя [12] при одновременном развитии процессов малоциклового усталости и ползучести для суммирования повреждений примем закон в форме (7):

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}_p^{n_p} + \dot{\omega}_c^{n_c}. \quad (10)$$

С учетом того, что суммирование повреждений (10) начинается только после фазы зарождения процесса малоциклового усталости (МЦУ), характеризуемого значением энергии повреждения  $W_{pa}$  будем иметь:

$$\dot{\omega} = \begin{cases} H \left( \frac{W_p}{W_{pa}} - 1 \right) \dot{\omega}_p^{n_p} + \dot{\omega}_c^{n_c}, & W_p > W_{pa} \\ 0, & W_p \leq W_{pa} \end{cases} \quad (11)$$

где  $H(Z) = \begin{cases} 1, & Z > 0 \\ 0, & Z \leq 0 \end{cases}$ .

Рассмотрим как работает модель суммирования повреждений (11). Если часть долговечности материала исчерпывается в результате МЦУ, а затем материал доводится до разрушения в результате ползучести, то возможно два случая:

- первая фаза при МЦУ не завершена ( $H(Z)=0$ ) и ресурс материала полностью определяется его длительной прочностью;
- первая фаза завершена ( $H(Z)=1$ ). Остаточный ресурс при ползучести уменьшается на величину поврежденности при МЦУ в стадии накопления повреждений.

На рис. 1 представлен график суммирования повреждений для этих случаев. Сплошная линия – теоретическая кривая суммирования согласно (11), пунктир – правило линейного суммирования без фазы зарождения, штрих-пунктиром отделена зона не взаимодействия процессов накопления повреждений при МЦУ и ползучести. Кружочки – экспериментальные данные для [13]:  $\frac{N}{N_f} + \frac{t}{t_f} > 1$ . Если материал вначале подвергается

ползучести, а затем доводится до разрушения в результате МЦУ, то остаточная долговечность  $\omega_p$  в фазе распространения при МЦУ уменьшается на величину поврежденности в стадии ползучести. Однако, прежде чем достичь фазы распространения при МЦУ, необходимо вначале реализовать фазу зарождения. График суммирования повреждений в этом случае представлен на рис. 2:  $\frac{N}{N_f} + \frac{t}{t_f} > 1$  (доля срока службы  $\frac{N_a}{N_f}$  не зависит от длительности испытаний на ползучесть).

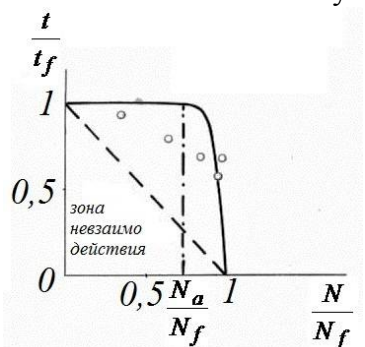


Рис. 1

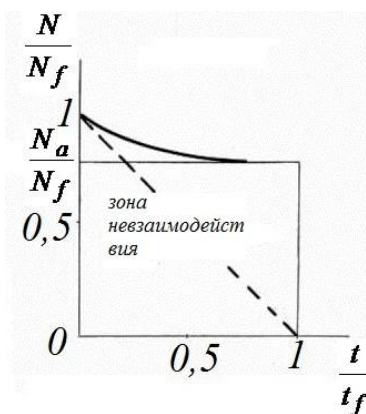


Рис. 2

Теоретические результаты для данных последовательной процессов ползучести и МЦУ (рис. 1 и рис. 2) соответствуют экспериментальным результатам [12, 13].

Если материал испытывает циклические деформации с выдержками различной длительности, то процессы накопления повреждений  $\omega_p$  и  $\omega_c$  протекают одновременно, однако, взаимодействие сдвигается во времени из-за наличия фазы зарождения при МЦУ. Поврежденность  $\omega_c$ , накопленная во время выдержек, уменьшает число циклов до разрушения по сравнению с чистой малоцикловой усталостью, что наблюдается экспериментально. Наличие влияния вида напряженного состояния обеспечивает различную скорость накопления повреждений при выдержках в полциклах растяжения и сжатия.

## 2. Результаты численных экспериментов.

Для оценки адекватности моделей процессов деформирования и накопления повреждений в материалах при различных режимах нагружения необходимо создание на базе этих моделей математических моделей типовых экспериментов по деформированию и разрушению лабораторных образцов. При этом предполагается, что локальное поведение материала в объеме конструкции адекватно поведению рабочей части гладкого об-

разца при тех же условиях деформирования: эффекты вязкопластического деформирования конструкционного материала, влияние последовательности и времени приложения нагрузок, история изменения напряженно-деформированного состояния, процессы накопления повреждений и развития дефектов в рабочей части образца должны быть те же, что и в моделируемом объеме материала конструкции. Указанное предположение накладывает жесткие требования на форму и геометрические размеры образцов, средства нагружения и нагрева, параметры нагружения и нагрева, измерительные системы, средства управления экспериментом, технологию изготовления образцов и качество их поверхности. Для механики поврежденной среды, описывающей эволюцию рассеянных по объему материала дефектов, наиболее оптимальной формой лабораторных образцов являются трубчатые тонкостенные образцы специальной формы с внутренним нагревом специальными нагревателями, обеспечивающими в пределах рабочей части однородность напряженно-деформированного состояния и температурного поля при циклическом изменении нагрузки и температуры. В этих условиях средствами измерения гарантируется точное определение напряжений, деформаций и температуры в объеме рабочей части образца и, следовательно, точное измерение изменения этих экспериментальных параметров в результате развития процессов повреждения в материале. При условии соответствующей технологии изготовления этих образцов гарантируется также разрушение образцов в рабочей части и адекватность долговечности рабочей части образцов долговечности материала при тех же условиях нагружения. Если указанные условия соблюдены, то математическая модель эксперимента фактически описывается соответствующими уравнениями состояния материала применительно к напряженно-деформированному состоянию, реализуемому в рабочей части образца. Наиболее широко распространенными экспериментами по исследованию процессов деформирования и разрушения конструкционных материалов, являются эксперименты по одноосному растяжению-сжатию трубчатых образцов.

Ниже представлены некоторые результаты численного эксперимента по одноосному растяжению-сжатию лабораторного образца при различных режимах нагружения.

На рис. 3 показаны теоретические результаты для процесса жесткого симметричного деформирования при постоянной амплитуде деформаций с учетом влияния поврежденности на механические характеристики материала. Звездочкой отмечен расчетный момент разрушения образца.

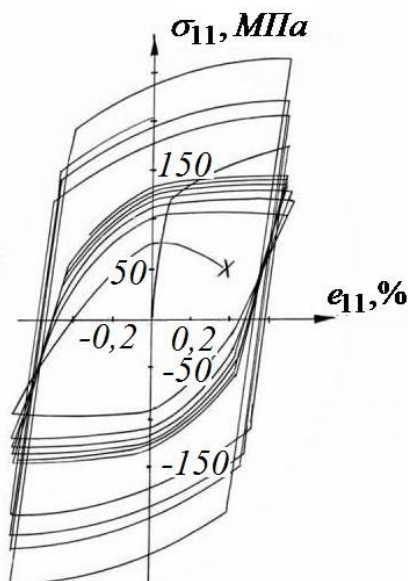


Рис. 3

На рис. 4–6 показаны вычисленные изменения упругих модулей, амплитуды напряжений и процесс накопления повреждений  $\omega_p$  для различных амплитуд деформаций при жестком симметричном циклическом нагружении. Изменение модулей упругости и накопление параметра  $\omega_p$  происходит только в фазе распространения микродефектов. Начальные участки кривых изменения амплитуд напряжений соответствуют периоду циклического упрочнения материала, заключительные – падению амплитуд напряжений в результате накопленной поврежденности  $\omega_p$  в фазе распространения микродефектов.

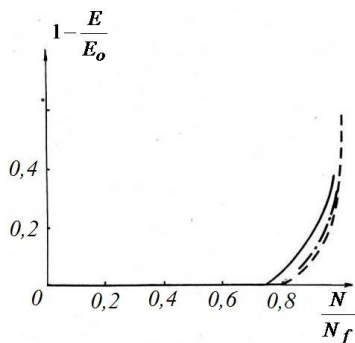


Рис. 4

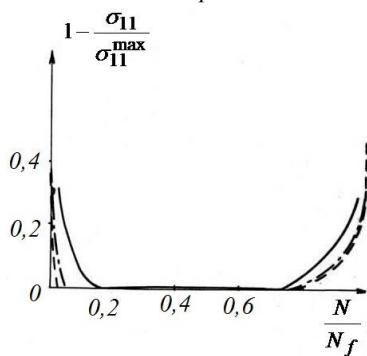


Рис. 5

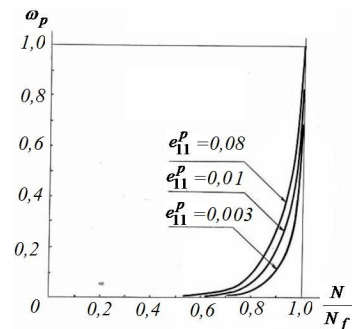


Рис. 6

На рис. 7 показаны экспериментальные (кружочки) и вычисленные (ромбики и крестики) кривые малоциклового усталости стали I2X18H9 при  $T = 650^\circ\text{C}$ . Ромбиками обозначена кривая малоциклового усталости, вычисленная в предположении, что вся энергия  $\int_0^t \rho_{ij} \dot{e}_{ij}^p dt$  затрачивается на повреждение материала. Крестиками – в предположении, что на повреждение затрачивается только энергия, соответствующая положительным значениям  $\int_0^t \dot{W}_p dt$ .

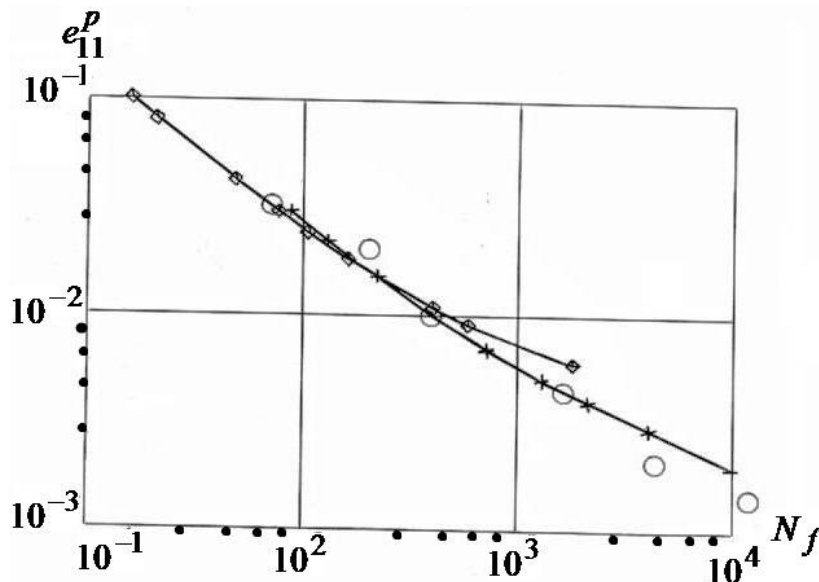
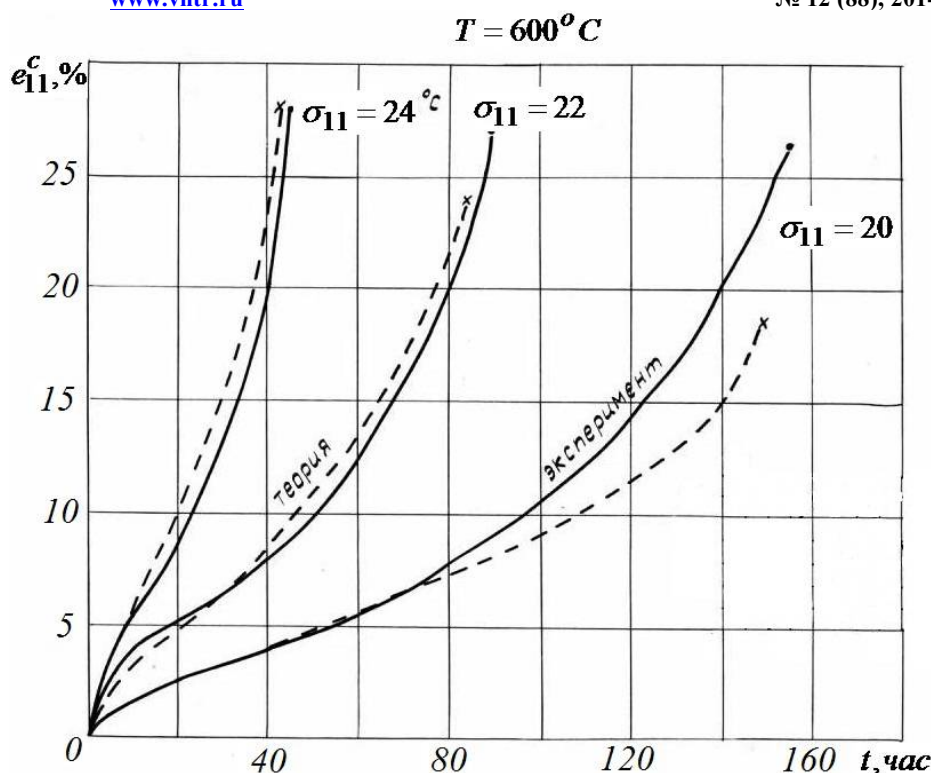


Рис. 7

На рис. 8 показаны экспериментальные (сплошные линии) и расчётные (пунктир) кривые ползучести. Звёздочками отмечены моменты разрушения образцов.



#### 4. Заключение.

В классических методах для оценки долговечности материала в условиях одновременного протекания процессов МЦУ и поврежденности в результате ползучести предложено несколько эмпирических методов [14]: метод учета частоты цикла, метод оценки полного времени до разрушения по продолжительности одного цикла, метод разделения размаха деформаций, метод суммирования долей поврежденности и т.д.

Основным отличием данного подхода от традиционных является связь скорости накопления повреждений со скоростью изменения некоторого энергетического параметра и величиной этого параметра, рассчитываемых из уравнений состояния с учетом деформационной и временной истории, учете влияния вида напряженного состояния и введение в эволюционное уравнение двух фаз накопления повреждений. Данная формулировка эволюционных уравнений в отличие от формулировок, связывающих скорость накопления повреждений с количеством циклов при МЦУ или временем до разрушения при ползучести, позволяет более обоснованно подойти к проблеме суммирования повреждений при многопараметрическом нагружении и рассчитывать процессы с неявно выраженными циклами в условиях одновременного развития процессов поврежденности от МЦУ и ползучести.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00204-а).

#### Список литературы

1. Хажинский Г.М. О теории ползучести и длительной прочности металлов. Инж. ж. МТТ, 1971, №6, С. 29-36.
2. Дульнев Р. А., Котов П. И. Термическая усталость металлов. – М.: Машиностроение, 1980. – 200с.

3. Работнов Ю.И. Механизм длительного разрушения – Вопросы прочности материалов и конструкций, АН СССР, 1959.
4. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974.
5. Ильюшин А.А. Об одной теории длительной прочности // Механика твердого тела, 1967. Т. 3, С. 21–35.
6. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. Сопротивление полимерных и композитных материалов. Рига, Зинатие, 1980.
7. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР, ОТН, 1958, № 8.
8. Леметр Ж. Применение понятия поврежденности для расчёта разрушения в условиях одновременной усталости и ползучести / Леметр, Пламтри // Теоретические методы инженерных расчётов. Труды американского общества инженеров-механиков, №3, 1979, С. 124–134.
9. Киселевский В.Н. Кинетический критерий разрушения металлов при совместном малоцикловом и квазистатическом нагружениях / В. Н. Киселевский // Проблемы прочности. Киев. №1. 1982. С. 8–12.
10. Джеймс Некоторые вопросы взаимодействий ползучести и усталости / Джеймс // Теоретические методы инженерных расчётов. Труды американского общества инженеров-механиков, №3, 1976, С. 44–53.
11. Ёкабори Т. Подход к проблеме взаимодействия усталости и ползучести / Ёкабори, М. Инхикава // Механика деформируемых тел и конструкций. –М.: Машиностроение. 1975. С. 178–182.
12. Savalle S. Microanureage, micropropagation et endommagement / S. Savalle, G. Caienatd // La Resherche Aerospatiale. 1982. vol. 6. P. 395 – 411.
13. Chaboche J. L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation / J. L. Chaboche // Engineering Design. 1981. vol. 64. P. 233-247.
14. Дульнев Р. А., Котов П. И. Термическая усталость металлов. – М.: Машиностроение, 1980. – 200 с.