

УДК 539.3

Повзучість та руйнування пластин з надрізами в умовах циклічного навантаження / Г. О. Аніщенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 58 (1031). – С. 16-23. – Бібліогр.: 6 назв.

Надані результати чисельних досліджень повзучості та руйнування пластин, які послаблені гострими надрізами. Встановлено суттєвий вплив циклічного навантаження на релаксацію напружень, на накопичення пошкоджень й руйнування пластин внаслідок динамічної повзучості.

Ключові слова: надрізи, циклічне навантаження, релаксація напружень, пошкоджуваність, руйнування, динамічна повзучість.

Numerical results on creep and destruction for plates weakened by snips are presented. The essential influence of a high-frequency loading on stress relaxation, damage accumulation, and plate's fracture due to dynamic creep is established.

Keywords: snips, high-frequency loading, stress relaxation, damage, fracture, dynamic creep.

УДК 539.3

Д. В. БРЕСЛАВСКИЙ, д-р техн. наук, профессор, НТУ «ХПІ»;
В. А. МЕТЕЛЕВ, студент, НТУ «ХПІ»;
О. К. МОРАЧКОВСКИЙ, д-р техн. наук, профессор, НТУ «ХПІ»;
О. А. ТАТАРИНОВА, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПІ»

РАСЧЕТЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Статья посвящена расчетам динамической ползучести и повреждаемости элементов конструкций, изготовленных из ортотропных материалов, на основе разработанного авторами метода. Описание закономерностей повреждающихся вследствие ползучести материалов осуществлено на основе тензорных соотношений инкрементальной теории ползучести, использующих тензорный параметр повреждаемости. Эти соотношения с помощью метода многих масштабов и усреднения на периоде изменения нагрузки преобразованы в соотношения динамической ползучести анизотропных материалов, повреждающихся вследствие ползучести. Расчеты для циклически нагруженных плоских тел выполнены методом конечных элементов. Для ползучести пластины с центральным отверстием, изготовленной из титанового сплава, численно получены изменения во времени компонент перемещений и тензорных полей напряжений, деформаций, по значениям параметра повреждаемости дана оценка времени до разрушения.

Ключевые слова: ползучесть, повреждаемость, циклическое нагружение, тензорный параметр повреждаемости, МКЭ, пластина с отверстием, титановый сплав.

© Д. В. Бреславский, В. А. Метелев, О. К. Морачковский, О. А. Татарина, 2013

1 Введение. Легкие сплавы и металлические композиционные материалы широко используются в промышленности. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что материалы рассматриваемого класса обладают анизотропией свойств ползучести и связанной с ней повреждаемостью, что требует использования тензорных характеристик для описания свойств деформации ползучести и повреждаемости. Такие модели для случая статического нагружения были предложены Мураками [1], Кордебуба-Сидоровым [2], О.К.Морачковским [3] и другими, в последние годы эти подходы были использованы в расчетах конструкций.

Часто элементы конструкций подвергаются совместному действию статических и циклически повторяющихся нагрузок. Как известно [4], в этом случае в материале развиваются процессы так называемой динамической ползучести. Для них характерно существенные ускорения ползучести и повреждаемости, что приводит к уменьшению времени до окончания разрушения по сравнению со статическим нагружением.

При статическом нагружении уравнения состояния ползучести начально ортотропных материалов с тензорным параметром повреждаемости рассмотрены ранее в [3]. В данной работе эти соотношения с помощью метода многих масштабов и усреднения на периоде нагрузки преобразованы в соотношения динамической ползучести анизотропных материалов, повреждающихся вследствие ползучести. Для материалов с изотропными свойствами определяющие уравнения для описания динамической ползучести с повреждаемостью ранее были предложены в работах [5, 6].

2 Законы анизотропной ползучести с повреждаемостью. Рассмотрим физические соотношения ползучести с повреждаемостью для анизотропных материалов, соответствующие общей линейной тензорной зависимости для главных осей симметрии ползучести и повреждаемости анизотропного тела. Накопление повреждаемости в этом случае будет описываться тензором второго ранга ω_{ij} .

Будем предполагать, что тензору повреждаемости ω_{ij} , как внутреннему параметру состояния, соответствует ассоциированный с ним тензор R_{ij} – поток термодинамических напряжений в повреждаемой среде. Для материалов с начальной анизотропией эквивалентное напряжение σ_V определим через совместные инварианты тензора напряжений σ_{ij} с материальными тензорами a_{ij} , b_{ijkl} , а эквивалентное напряжение σ_{*V} определим, соответственно, через совместные инварианты тензора σ_{ij} с материальными тензорами g_{ij} , d_{ijkl} :

$$\sigma_V = \sigma_1 + \sigma_2, \quad \sigma_1 = a_{ij}\sigma_{ij}, \quad \sigma_2 = \sqrt{b_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl}};$$

$$\sigma_{*V} = \sigma_{*1} + \sigma_{*2}, \quad \sigma_{*1} = g_{ij}\sigma_{ij}, \quad \sigma_{*2} = \sqrt{d_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl}}.$$

Потенциалы диссипации для скоростей деформаций ползучести и повреждаемости представим в виде:

$$\dot{D} = \dot{D}(\sigma_V; \eta, T) = \sigma_{ij} \dot{c}_{ij}; \quad \dot{\Omega} = \dot{\Omega}(\sigma_{*V}; \eta, T) = \sigma_{ij} \dot{\omega}_{ij}. \quad (1)$$

Кинетические уравнения для скоростей деформаций ползучести и повреждаемости с использованием градиентального закона принимаем в виде:

$$\dot{c}_{ij} = \dot{\lambda} \frac{\partial \dot{D}}{\partial \sigma_{ij}}; \quad \dot{\omega}_{ij} = \dot{\lambda}_* \frac{\partial \dot{\Omega}}{\partial R_{ij}},$$

где скалярные множители $\dot{\lambda}, \dot{\lambda}_*$ в дальнейшем определим из равенств (1) после конкретизации вида каждого из потенциалов.

Для формулирования критерия разрушения в инвариантной скалярной форме рассмотрим ту часть диссипации, которая происходит вследствие повреждаемости, и ее предельное значение в момент времени при окончании скрытого разрушения:

$$\Omega(t) = \int_0^t \dot{\Omega} dt, \quad \Omega_* = \int_0^{t_*} \dot{\Omega} dt.$$

Предположим, что предельное значение диссипации вследствие повреждаемости материала при ползучести является вполне определенной характеристикой материала. В этом случае, принимая в качестве энергетической скалярной меры для критерия разрушения величину $\eta(t) = \Omega(t)/\Omega_*$, критерий разрушения можно записать в виде $\eta(t_*) = 1$, где t_* – значение времени в момент разрушения.

Используя термодинамические допущения для материалов с начальной анизотропией при ползучести, получим следующие уравнения состояния:

$$\dot{c}_{ij} = \frac{\dot{D}}{\sigma_V} \left(a_{ij} + \frac{b_{ijkl} \sigma_{kl}}{\sigma_2} \right), \quad \dot{\omega}_{ij} = \frac{\dot{\eta}}{R_V} \left(g_{ij} + \frac{d_{ijkl} R_{kl}}{R_2} \right), \quad (2)$$

где c_{ij}, ω_{ij} – симметричные тензоры необратимых деформаций ползучести и повреждаемости; $\dot{D} = \sigma_{ij} \dot{c}_{ij}$ – мощность диссипации вследствие ползучести; $\dot{\eta} = R_{ij} \dot{\omega}_{ij}$ – мощность диссипации вследствие повреждаемости, отнесенная к предельному значению диссипации Ω_* в момент разрушения (мера повреждаемости, $0 \leq \eta \leq 1$).

Используя принцип эквивалентности деформаций, влияние тензора повреждаемости на эффективные напряжения учтем при использовании следующего равенства: $R_{ij} = \sigma_{ij} / (1 - \eta)$, причем $\dot{\eta} = R_{ij} \dot{\omega}_{ij}$, ($0 \leq \eta \leq 1$), $\eta(t_*) = 1$.

При сохранении требования основного термодинамического неравенства $\dot{D} + \dot{\Omega} \geq 0$ диссипативные потенциалы (1) теперь можно записать следующим образом:

$$\dot{D}(\sigma_V; \eta, T) = \dot{D}(R_V), \quad \dot{\Omega}(\sigma_{*V}; \eta, T) = \dot{\Omega}(R_{*V}), \quad (3)$$

где $R_V = \sigma_V / (1 - \eta)$; $R_{*V} = \sigma_{*V} / (1 - \eta)$ – инварианты эффективного напряжения.

В рамках принятых допущений главные направления материальной анизотропии считаются неизменными вплоть до разрушения, а поверхности потенциалов диссипации в пространстве напряжений расширяются со временем пропорционально одному параметру, связанному с принятой мерой повреждения $0 \leq \eta \leq 1$.

Далее рассмотрим уравнения состояния (2) для трансверсально-изотропных при ползучести материалов. Потенциалы диссипации (3) конкретизируем в виде степенных функций от инвариантов напряжений:

$$\dot{D} = R_V^N, \quad \dot{\eta} = R_{*2}^k / (1 - \eta)^S, \quad (4)$$

где N, k, S – константы.

Уравнения (2) рассматриваются как уравнения состояния для материалов с начальной анизотропией и с асимметрией свойств ползучести и повреждаемости, в частности, при растяжении и сжатии. При отсутствии эффектов асимметрии свойств $a_{ij} = g_{ij} = 0$. В этом случае для трансверсально-изотропных материалов уравнения состояния ползучести с учетом повреждаемости могут быть переписаны следующим образом:

$$\dot{\underline{c}} = b_{1111}^{(N+1)/2} \frac{\bar{\sigma}_2^{N-1}}{(1-\eta)^N} [B] \underline{\sigma}, \quad \dot{\underline{w}} = d_{1111}^{k/2} \frac{\sigma_{*2}^{k-2}}{(1-\eta)^{k+S-1}} [D] \underline{\sigma}, \quad (5)$$

$$\dot{\eta} = d_{1111}^{k/2} \frac{\sigma_{*2}^k}{(1-\eta)^{k+S}}, \quad \eta(0) = 0, \quad \eta(t_*) = 1, \quad (6)$$

где $\dot{\underline{c}} = (\dot{c}_{11}, \dot{c}_{22}, 2\dot{c}_{12})^T$, $\underline{\sigma} = (\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12})^T$, $\dot{\underline{w}} = (\dot{w}_{11}, \dot{w}_{22}, 2\dot{w}_{12})^T$ – векторы скоростей деформаций ползучести, напряжений и скоростей параметра повреждаемости; $\bar{\sigma}_2^2 = \underline{\sigma}^T [B] \underline{\sigma}$, $\sigma_{*2}^2 = \underline{\sigma}^T [D] \underline{\sigma}$ – инварианты напряжений,

$$[B] = \begin{vmatrix} 1 & \beta_{12} & 0 \\ \beta_{21} & \beta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 4\beta \end{vmatrix}, \quad \beta_{12} = -\frac{1}{2} b_{1111}, \beta_{22} = \frac{b_{2222}}{b_{1111}}, 4\beta = \frac{b_{1212}}{b_{1111}},$$

$$[D] = \begin{vmatrix} 1 & \delta_{12} & 0 \\ \delta_{21} & \delta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 4\delta \end{vmatrix}, \quad \delta_{12} = -\frac{1}{2} d_{1111}, \delta_{22} = \frac{d_{2222}}{d_{1111}}, 4\delta = \frac{d_{1212}}{d_{1111}}.$$

Для приведенной модели ползучести получим уравнения, описывающие влияние циклического нагружения на ползучесть и повреждаемость [4]. Принимаем, что тензор напряжений состоит из статической составляющей σ_0 и быстро изменяющейся составляющей σ_1 : $\sigma = \sigma_0 + \sigma_1$, $\sigma_1 = \sigma^a \sin(2\pi ft)$. f – частота вынужденных колебаний, $f = 1/T$; σ^a – амплитудное значение напряжения. Воспользуемся описанным в работе [6] методом, использованным там для уравнений со скалярным параметром повреждаемости. Используем метод многих масштабов и асимптотические разложения основных неизвестных по

малому параметру $\mu = T/t$.

Применим этот подход к уравнениям (5)–(6). Представим в виде асимптотических разложений процессы роста деформаций ползучести и накопления повреждаемости в двух масштабах времени (медленном и быстром $\xi = \tau/T$, где $\tau = t/\mu$):

$$c \cong c^0(t) + \mu c^1(\xi), \quad \eta \cong \eta^0(t) + \mu \eta^1(\xi), \quad \omega \cong \omega^0(t) + \mu \omega^1(\xi), \quad (7)$$

где $c^0(t)$, $\eta^0(t)$, $\omega^0(t)$, $c^1(\xi)$, $\eta^1(\xi)$, $\omega^1(t, \xi)$ – функции, отвечающие основному процессу ползучести с повреждаемостью в медленном (0) и быстром (1) масштабах времени.

Учитывая зависимость деформации ползучести, параметра и меры повреждаемости только от «медленного» времени [5], после усреднения получим:

$$\begin{aligned} \langle c^0(\xi) \rangle &= \int_0^1 c^0(t) d\xi \cong c^0(t); & \langle c^1(\xi) \rangle &= \int_0^1 c^1(\xi) d\xi \cong 0; \\ \langle \eta^0(\xi) \rangle &= \int_0^1 \eta^0(t) d\xi \cong \eta^0(t); & \langle \eta^1(\xi) \rangle &= \int_0^1 \eta^1(\xi) d\xi \cong 0; \\ \langle \omega^0(\xi) \rangle &= \int_0^1 \omega^0(t) d\xi \cong \omega^0(t); & \langle \omega^1(\xi) \rangle &= \int_0^1 \omega^1(\xi) d\xi \cong 0. \end{aligned}$$

Таким образом, используя метод асимптотических разложений с последующим усреднением на периоде циклического нагружения, для случая сложного напряженного состояния получим уравнения состояния для динамической ползучести с повреждаемостью для сплавов с ортотропными при ползучести свойствами:

$$\dot{\underline{c}} = b_{1111}^{(N+1)/2} K(A_n) \frac{\bar{\sigma}_2^{N-1}}{(1-\eta)^N} [B] \underline{\sigma}; \quad \dot{\underline{\omega}} = d_{1111}^{k/2} H_1(A_k) \frac{\sigma_{*2}^{k-2}}{(1-\eta)^{k+S-1}} [D] \underline{\sigma}; \quad (8)$$

$$\dot{\eta} = d_{1111}^{k/2} H_2(A_k) \frac{\sigma_{*2}^k}{(1-\eta)^{k+S}}; \quad \eta(0) = 0, \quad \eta(t_*) = 1, \quad (9)$$

где
$$K(A_n) = \int_0^1 (1 + A_n \sin(2\pi\xi))^N d\xi; \quad H_1(A_k) = \int_0^1 (1 + A_k \sin(2\pi\xi))^{k-1} d\xi;$$

$$H_2(A_k) = \int_0^1 (1 + A_k \sin(2\pi\xi))^k d\xi; \quad A_n = \frac{\bar{\sigma}_2^a}{\sigma_2}; \quad A_r = \frac{\sigma_{*2}^a}{\sigma_{*2}}; \quad (\bar{\sigma}_2^a)^2 = (\underline{\sigma}^a)^T [B] \underline{\sigma}^a;$$

$(\sigma_{*2}^a)^2 = (\underline{\sigma}^a)^T [D] \underline{\sigma}^a$ – инварианты циклических напряжений.

3 МКЭ для решения плоской задачи. Рассматриваем постановку двумерной задачи теории ползучести для плоского напряженного состояния.

Пусть плоское тело объемом V , изготовленное из материала с анизотропными свойствами ползучести и повреждаемости, закреплено по части поверхности S_1 и нагружено поверхностными силами $p \{p_1, p_2\}$ на остальной части поверхности S_2 . В системе координат OX_1X_2 плоское движение континуума материальных точек при ползучести будем описывать в рамках Лагранжевого подхода. Введем в рассмотрение вектор смещений точек $u = \{u_1, u_2\}^T$ и их скорости $v = \{v_1, v_2\}^T$. В этих предположениях задача ползучести для случая малых смещений и деформаций описывается следующей начально-краевой задачей:

$$\sigma_{ij,j} + f_i = \rho \dot{v}_i, \quad (i,j=1,2) \quad x_1, x_2 \in V; \quad \sigma_{ij} n_j = p_i + p_i^a \sin 2\pi f t, \quad x_1, x_2 \in S_2. \quad (10)$$

$$v_1 = du_1/dt = \dot{u}_1; \quad v_2 = du_2/dt = \dot{u}_2 \quad (11)$$

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}, \quad \varepsilon_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}, \quad \varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right). \quad (12)$$

Рассматриваем случай, когда напряжения не превосходят предела текучести материала. Принимаем, что компоненты упругих деформаций e_{ij} и деформаций ползучести c_{ij} , а также их скорости, аддитивны:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{e}_{ij} + \dot{c}_{ij}, \quad (13)$$

Полученная система уравнений (10)-(13) должна решаться совместно с уравнениями состояния (8)-(9), причем необходимо добавить граничные условия на частях поверхности S_1 : $\dot{u}_i = \dot{u}_i^*$ и S_2 : $\dot{\sigma}_{ij} n_j = \dot{p}_i$ и начальные условия, считая, что в момент времени $t = 0$ напряженно-деформированное состояние определяется решением задачи теории упругости.

Система (8-13) решается путем использования метода двух масштабов времени совместно с осреднением за период вынужденных колебаний $1/f$. Полное описание применения данного метода можно найти в [5,6]. Таким образом, задача сводится к упрощенной, подобной задаче со статическим нагружением, но с уравнениями состояния (8)-(9).

В расчетах использован метод конечных элементов с использованием линейных треугольных элементов. Разрешающее уравнение МКЭ, сформулированное в скоростях, имеет вид:

$$[K] \dot{\underline{\delta}} = \dot{\underline{F}} + \dot{\underline{F}}_c, \quad (14)$$

где $[K] = \sum_e \int [B]^T [D][B] dV$ – глобальная матрица системы;

$\dot{\underline{F}} = \sum_e \int [N]^T \dot{p} d\Sigma$, $\dot{\underline{F}}_c = \sum_e \int [B]^T \underline{\sigma}^* dV$ – векторы, составляющие глобальный вектор нагружения тела и фиктивных сил, определяемых деформациями ползучести.

Программное обеспечение для расчетов разработано в НТУ «ХПИ».

4 Анизотропная ползучесть и повреждаемость в титановых пластинах. Разработанный метод и программное обеспечение были использованы для моделирования ползучести и повреждаемости в титановых пластинах из сплава ВТ1-0 (аналоги – сплавы IM125 или Т40). Свойства ползучести и длительной прочности образцов, вырезанных из плоского листа в трех направлениях, были экспериментально получены при температуре $T = 773$ °К О. К. Морачковским и В. Н. Конкиным [7]. Значения констант в уравнениях (8)-(9), полученные после обработки экспериментальных данных, следующие:

$$\begin{aligned} b_{1111} &= 2,303 \cdot 10^{-4}, & b_{1122} &= -1,151 \cdot 10^{-4}, & b_{2222} &= 1,924 \cdot 10^{-4}, \\ b_{1212} &= 2,058 \cdot 10^{-4}, & & & & & (МПа)^{-2N/N+1}/(ч)^{2N+1}, & d_{1111} &= 3,542 \cdot 10^{-5}, \\ d_{1122} &= -1,771 \cdot 10^{-5}, & d_{2222} &= 3,324 \cdot 10^{-5}, & d_{1212} &= 3,127 \cdot 10^{-5}, & & & (МПа)^{-2}/(ч)^{2k}, \\ & & & & & & & & k = N = 5, s = 1. \end{aligned}$$

Вначале, для оценки достоверности получаемых результатов, было проведено сравнение численных расчетов с экспериментальными данными при статической ползучести вплоть до разрушения для образцов, вырезанных в различных направлениях. Образцы рассматривались как длинные прямоугольные пластины при растяжении. Отличия не превосходили 25-32 %.

Далее были численно промоделированы статическая и динамическая ползучесть титановой пластины (0,8 м x 0,8 м) с центральным отверстием, радиус которого равен 0,1 м. Была рассмотрена одна четверть пластины и проанализированы напряженно-деформированное состояние и изменение повреждаемости во времени. На рисунке представлено распределение меры повреждаемости для случая статического нагружения с нагрузкой в 10 МПа в момент времени $t = 220$ час, близком к моменту времени до разрушения $t_* = 221$ час. Расчетами установлена нелинейная зависимость характеристик ползучести и повреждаемости от нагрузки: так, например, увеличение нагрузки с 10 до 13 МПа приводит к уменьшению времени до разрушения от 221 часа до 68,5 часа.

Приведем результаты моделирования динамической ползучести этой же пластины. Осевая нагрузка в данном случае состоит из статической составляющей $p_0 = 16,9$ МПа и циклической, которая изменяется по синусоидальному закону с частотой 10 Гц. Введем параметр нагружения $L = p_0/p_a$ где p_a – амплитудное значение нагрузки. Рассмотрено изменение L от 0 до 0,3.

Время до разрушения при такой программе нагружения уменьшается с увеличением L от 0,166 ч для $L = 0$ до 0,122 ч для $L = 0,3$. Установлено, что характер перераспределения напряжений и меры повреждаемости качественно совпадает со случаем статического нагружения, но имеет место существенное ускорение процессов ползучести и последствия вследствие динамической ползучести.

Расчетами установлено, что для малых значений нагрузок, и соответственно, малых значений напряжений в пластине, характер процесса отличается

ся от выше проанализированного. Динамическая нагрузка ускоряет релаксацию напряжений в области отверстия, как и в случае динамической ползучести [6], при которой уровень напряжений настолько мал, что скорость накопления повреждаемости значительно снижается. Например, для $p_0 = 13$ МПа время до разрушения для $L = 0$ составляет $t_* = 68,5$ ч, но добавление малой циклической составляющей ($L = 0,05$) приводит к увеличению времени $t_* = 72,6$ ч. Последующее увеличение L приводит к аналогичному увеличению времени до разрушения в связи с быстрой динамической релаксацией в начале процесса: для $L = 0,1$; $t_* = 120,1$ ч.

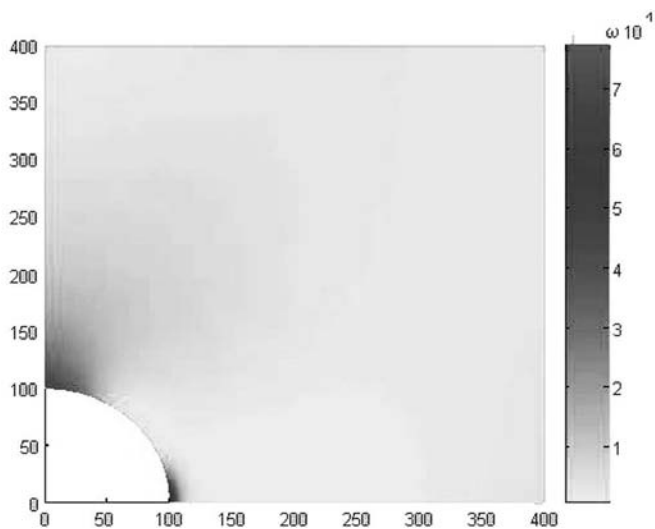


Рисунок – Распределение меры повреждаемости при $t = 220$ ч

5 Выводы. В статье представлен метод для эффективного математического моделирования динамической ползучести и повреждаемости в элементах конструкций, изготовленных из материалов с анизотропными свойствами. Использование метода двух масштабов времени совместно с асимптотическим разложением по малому параметру и последующим осреднением на периоде позволяет избежать прямого интегрирования по циклу и решать задачу при действии только статической нагрузки, но с уравнениями состояниями специального вида, полученными в работе. Эффекты существенного ускорения роста деформаций и накопления повреждаемости, а также релаксации напряжений при динамической ползучести установлены для пластины с отверстием, изготовленной из титанового сплава с анизотропными свойствами ползучести и повреждаемости.

Список литературы: 1. *Murakami S.* Notion of Continuum Damage Mechanics and Its Application to Anisotropic Creep Damage Theory / *S. Murakami* // Journ. Engng. Mater. Techn. – 1983. – Vol. 105. – P. 99-105. 2. *Cordebois J. P.* Damage Induced Elastic Anisotropy / *J. P. Cordebois, F. Sidoroff* //

Mechanical Behavior of Anisotropic Solids. // J. P. Boehler, editor. – Colloque Euromech 115, Villard-de-Lans, June 19-22. – Martinus Nijhoff Publishers, 1979. – P. 761-774. 3. Морачковский О.К. Исследование влияния на ползучесть материалов приобретенной анизотропии вследствие предварительной ползучести / О.К. Морачковский, М.А. Пасынок // Вестник ХГПУ. – Х.: ХГПУ, 1998. – Вып. 27. – С. 197-203. 4. Таїра С. Теория высокотемпературной прочности материалов / С. Таїра, Р. Отани. – М.: Металлургия, 1986. – 280 с. 5. Breslavsky D. A new model of nonlinear dynamic creep / D. Breslavsky, O. Morachkovsky // IUTAM Symposium on Anisotropy, Inhomogeneity and Nonlinearity in Solid Mechanics. – Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1995. – PP. 161-166. 6. Breslavsky D. Dynamic creep continuum damage mechanics: FEM-based design analysis / D. Breslavsky, O. Morachkovsky // Computational Plasticity: Fundamentals and Applications. Proc. of the Fifth International Conference on Computational Plasticity held in Barcelona, Spain, 17-20 March 1997. – IMNE, Barcelona IMNE, 1997. – Part 1. – PP. 1071-1076. 7. Конкин В.Н. Ползучесть и длительная прочность легких сплавов, проявляющих анизотропные свойства / В.Н. Конкин, О.К. Морачковский // Проблемы прочности. – 1987. – № 5. – С. 38-42.

Поступила в редколлегию 01.06.2013

УДК 539.3

Расчеты динамической ползучести и повреждаемости элементов конструкций из анизотропных материалов / Д. В. Бреславский, В. А. Метелев, О. К. Морачковский, О. А. Татаринова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 58 (1031). – С. 23-31. – Бібліогр.: 7 назв.

Статтю присвячено розрахункам динамічної повзучості і пошкоджуваності елементів конструкцій, що виготовлені з ортотропних матеріалів, на основі методу, який розроблено авторами. Для таких матеріалів опис закономірностей повзучості з пошкодженням здійснено на основі тензорних співвідношень, що використовують тензорний параметр пошкоджуваності для інкрементальної теорії повзучості. Ці співвідношення за допомогою методу багатьох масштабів та усереднення на періоді навантаження перетворені в співвідношення динамічної повзучості анизотропних матеріалів, що пошкоджуються внаслідок повзучості. Розрахунки для циклічно навантажених плоских тіл виконані методом скінчених елементів. Для повзучості пластини з центральним отвором, яку виготовлено з титанового сплаву, чисельно отримані зміни у часі компонент переміщень та тензорних полів напружень, деформацій, і за значеннями параметру пошкоджуваності надано оцінку часу до руйнування.

Ключові слова: повзучість, пошкоджуваність, циклічне навантаження, тензорний параметр пошкоджуваності, МСЕ, пластина з отвором, титановий сплав.

The paper is devoted to the calculations of dynamic creep and damage of structural elements made from orthotropic materials? By use of the method had been developed by authors. For these materials the creep-damage description were done by use of tensor relations which use tensor damage parameter for creep incremental theory. This relations were transformed to the dynamic creep-damage law for anisotropic materials by use of methods of many time scales and averaging over the period of loading. The calculations for cyclically loaded plane solids were done by use of Finite Element Method (FEM). The time variation of displacement components as well as stress and strain tensor fields for creep of plate with central hole made from titanium alloy were obtained numerically. By use of damage parameter value the fracture times were estimated.

Keywords: creep, damage, cyclic loading, tensor damage parameter, FEM, plate with a hole, titanium alloy.