УДК 62.192:620.18

В.А. СКАЧКОВ, канд. техн. наук, доцент, ЗГИА, г. Запорожье
С.А. ВОДЕННИКОВ, докт. техн. наук, профессор, ЗГИА, г. Запорожье
В.И. ИВАНОВ, ст. препод., ЗГИА, г. Запорожье
В.И. ДОНЕНКО, канд. техн. наук, доцент, ЗГИА, г. Запорожье

К РАСЧЕТУ НАДЕЖНОСТИ УНИКАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Розроблено метод розрахунку надійності унікальних конструкцій, яку оцінюють перевищенням допустимого рівня поля структурних пошкоджень, обумовлених розподілом мікроструктурних напружень. Мікроструктурні напруження визначають із рішення зв’язаної статистичної задачі деформації та руйнування мікронеоднорідних середовищ.
Ключові слова: мікроструктурне напруження, мікроструктурні деформації, розподіл випадкових напружень, надійність конструкцій

Разработан метод расчета надежности уникальных конструкций, которую оценивают превышением допустимого уровня поля структурных повреждений, обусловленных распределением микроструктурных напряжений. Микроструктурные напряжения определяются из решения связанной статистической задачи деформирования и разрушения микронеоднородных сред.
Ключевые слова: микроструктурные напряжения, микроструктурные деформации, распределение случайных напряжений, надежность конструкций

The method of calculation for reliability of unique constructions, which is estimated by exceeding of the limited level of structural damages field, conditioned by distributing microstructure tensions, is developed. Microstructure tensions are determined from the decision of the connected statistical task for deformation and destruction of microunhomogeneous environments.
Keywords: Microstructure tensions, microstructure deformations, distributing of casual tensions, reliability of constructions

1. Введение

Создание ответственных уникальных высоконагруженных конструкций, разрушение которых приводит к катастрофическим последствиям, предполагает разработку методов оценки их надежности.

Известные методы оценки надежности конструкций основаны на положениях теории вероятности и случайных процессов [1,2]. Однако в данном подходе не учитываются структурные изменения, которые накапливаются в процесе функционирования конструкций.

2. Постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка метода оценки надежности уникальных конструкций, в основе которого рассматривают процесс появления и развития микроструктурных изменений.

3. Разработка методики расчета и ее апробация

Разрушение материала в условиях длительных статических или циклических нагружений происходит многостадийно, каждая стадия которого протекает на масштабном уровне, сопоставимом с элементами микроструктуры и приводит к изменению структурных элементов, как на микроскопическом, так и макроскопическом уровнях.

К числу структурных превращений относится накопление микроповреждений, которые реализуются в отдельных элементах материала (зернах, армирующих и связывающих элементах и т.д.). Появление микроповреждений характеризуется превышением случайного поля микронапряжений предельно-допустимой поверхности, определяемой критериями разрушения.

Для расчета полей микронапряжений решают связанную задачу деформирования и разрушения микронеоднородных тел в условиях циклического нагружения [3]:

$$\begin{gathered}\xi_{i\alpha,\alpha}=0\ ;\\ \xi_{ij}=Q_{ij\alpha\beta}\cdot\left[1-\aleph^{\mathrm{II}}(\xi,S,N)\right]\cdot\varepsilon_{\alpha\beta}\ ;\\ \varepsilon_{ij}=0{,}5\left(\chi_{i,j}+\chi_{j,i}\right)\ ;\\ \chi_i\big|_s=U_i^S\ ,\end{gathered}\tag{1}$$

где $\xi_{ij\xi}$, ε_{mn}, χ_i – случайные тензоры напряжений, деформаций и перемещений соответственно; U_i^S – детерминированный вектор перемещений границы тела; Q_{ijmn} – случайный тензор модулей упругости материала; $\aleph^{\mathrm{II}}(\xi,S,N)$ – случайная функция накопленных микроповреждений; S – тензор прочности элементов микроструктуры; N – число циклов нагружения.

При циклическом нагружении процесс накопления повреждений обусловлен влиянием предыстории разрушения и функцию накопления микроповреждений записывают как

$$\aleph^{\mathrm{II}}(\xi,S,N)=\int_0^N F(n)\cdot\omega^{\mathrm{II}}(\xi,S)\ dn\ ,\tag{2}$$

где $F(n)$ – функция, которая учитывает предысторию развития разрушений; $\omega^{\mathrm{II}}(\xi,S)$ – безразмерная функция микроповреждаемости.

Моментные функции первого и второго порядка для $\aleph^{\mathrm{II}}(\xi,S,N)$ определяют как

$$\left\langle\aleph^{\mathrm{II}}(\xi,S,N)\right\rangle=\int_0^N\left\{[F(r)]\cdot\left(\omega^{\mathrm{II}}\right)+\left[F(r)\cdot\hat{\omega}^{\mathrm{II}}\right]\right\}d\eta;\tag{3}$$

$$\left\langle\hat{\aleph}^{\mathrm{II}}(\xi_1,S,N_1)\cdot\hat{\aleph}^{\mathrm{II}}(\xi_2,S,N_2)\right\rangle=\int_0^{N_1}\int_0^{N_2}\left(\left\langle\Phi_{11}\cdot\Phi_{22}\right\rangle+\right.$$

$$+\left\langle\hat{F}_1\cdot\Phi_{12}\right\rangle\left\langle\omega_1\right\rangle+\left\langle\hat{F}_2\cdot\Phi_{21}\right\rangle\left\langle\omega_2\right\rangle+\left\langle\hat{\omega}_1\cdot\Phi_{22}\right\rangle\left\langle F_1\right\rangle+$$

$$+\left\langle\widehat{\omega}_2\cdot\Phi_{11}\right\rangle\left\langle F_2\right\rangle+K_{12}\cdot\left\langle\omega_1\right\rangle\left\langle\omega_2\right\rangle+\Omega_{12}\cdot\left\langle F_1\right\rangle\left\langle F_2\right\rangle+$$

$$+\left\langle\Phi_{12}\right\rangle\left\langle F_2\right\rangle\left\langle\omega_2\right\rangle+\left\langle\Phi_{21}\right\rangle\left\langle\omega_1\right\rangle\left\langle F_1\right\rangle-\left\langle\Phi_{11}\right\rangle\left\langle\Phi_{22}\right\rangle\Big)\, dn_1\, dn_2 \ , \qquad (4)$$

где $F_i = F(n_i)$; $\omega_i = \omega^{\mathrm{II}}(\xi_i, S)$; $\widehat{Q}_{ij} = Q - \langle Q\rangle$ – пульсации случайных функций; $K_{ij} = \left\langle \widehat{F}(n_i)\cdot\widehat{F}(n_j)\right\rangle;$ $\Phi_{ij} = \widehat{F}(n_i)\cdot\widehat{\omega}_j^{\mathrm{II}}$; $\langle ...\rangle$ – оператор статистического осреднения; $\Omega_{ij} = \left\langle\widehat{\omega}_i^{\mathrm{II}}\cdot\widehat{\omega}_j^{\mathrm{II}}\right\rangle;\ i,j = 1,2.$

Функция $\omega^{\mathrm{II}}(\xi, S)$ является локально-эргодической [3], а функция $\aleph^{\mathrm{II}}(\xi, S, N)$ удовлетворяет условиям локальной стационарности в трактовке А.Н.Колмогорова [4]. Данные функции записывают в виде

$$f_{\aleph^{\mathrm{II}}}(N_1,N_2) = \left\langle\aleph^{\mathrm{II}}(\xi_1,S,N_1)\right\rangle - \left\langle\aleph^{\mathrm{II}}(\xi_2,S,N_2) = f_{\aleph^{\mathrm{II}}}(N_1-N_2)\right\rangle \ ; \qquad (5)$$

$$D_{\aleph^{\mathrm{II}}}(N_1,N_2) = \left\langle\left|\widehat{\aleph}^{\mathrm{II}}(\xi_1,S,N_1) - \widehat{\aleph}^{\mathrm{II}}(\xi_2,S,N_2)\right|^2\right\rangle = D_{\aleph^{\mathrm{II}}}(N_1-N_2)\ . \qquad (6)$$

В соответствии с условиями (5) и (6) корреляционную функцию (4) определяют как:

$$\left\langle\widehat{\aleph}^{\mathrm{II}}(\xi_1,S,N_1)\cdot\widehat{\aleph}^{\mathrm{II}}(\xi_2,S,N_2)\right\rangle = \int\limits_0^{N_1}\int\limits_0^{N_1-N_2}\Big[\left\langle\widehat{F}(n_1)\cdot\widehat{F}(n_2)\right\rangle\left\langle\omega_1^{\mathrm{II}}\right\rangle\cdot\left\langle\omega_2^{I\!I\!I}\right\rangle+$$

$$+\left\langle\widehat{\omega}_1^{\mathrm{II}}\cdot\widehat{\omega}_2^{\mathrm{II}}\right\rangle\left\langle F(n_1)\right\rangle\left\langle F(n_2)\right\rangle\Big]\, dn_1\, dn_2\ . \qquad (7)$$

Условие эргодичности для функции (4) записывают в виде

$$lim_{\tau\Rightarrow\infty}\left\langle\widehat{\aleph}^{\mathrm{II}}(\xi_1,S,N)\cdot\widehat{\aleph}^{\mathrm{II}}(\xi_2,S,N+\tau)\right\rangle = 0\ . \qquad (8)$$

Решение системы уравнений (1) методами, изложенными в работе [3] для моментных функций первого и второго порядка распределения микронапряжений представляют как

$$\sigma_{ij} = \left\langle\xi_{ij}\right\rangle = \Big\lfloor\left\langle\theta^e_{ij\alpha\beta}\right\rangle + 0{,}5\, K^{\gamma\delta\alpha\beta}_{ij\omega\aleph}\cdot\left(I^{\omega\gamma}_{\aleph\delta} + I^{\aleph\gamma}_{\omega\delta}\right)\Big\rfloor\cdot e_{\alpha\beta}\ ; \qquad (9)$$

$$H^{mn}_{ij} = \left\langle\widehat{\xi}_{ij}\cdot\widehat{\xi}_{mn}\right\rangle = \Big\lfloor 0{,}25\left\langle\theta^e_{ij\alpha\beta}\right\rangle\left\langle\theta^e_{mn\gamma\delta}\right\rangle\left(I^{\alpha\alpha_1}_{\beta\beta_1} + I^{\beta\alpha_1}_{\alpha\beta_1}\right)\cdot$$

$$\cdot K^{\alpha_1\beta_1\alpha_2\beta_2}_{\gamma_1\delta_1\gamma_2\delta_2}\cdot\left(I^{\gamma\gamma_1}_{\delta\delta_1} + I^{\delta\gamma_1}_{\gamma\delta_1}\right) + 0{,}5\left\langle\theta^e_{ij\alpha\beta}\right\rangle\left(I^{\alpha\alpha_1}_{\beta\beta_1} + I^{\beta\alpha_1}_{\alpha\beta_1}\right)\cdot$$

$$\cdot K^{\alpha_1\beta_1\alpha_2\beta_2}_{mn\gamma_2\delta_2} + 0{,}5\left\langle\theta^{\acute{y}}_{mn\gamma\delta}\right\rangle\left(I^{\gamma\gamma_1}_{\delta\delta_1} + I^{\delta\gamma_1}_{\gamma\delta_1}\right)\cdot K^{ij\alpha_2\beta_2}_{\gamma_1\delta_1\gamma_2\delta_2} +$$

$$+ K^{ij\alpha_2\beta_2}_{mn\gamma_2\delta_2}\Big\rfloor\cdot e_{\alpha_2\beta_2}\cdot e_{\gamma_2\delta_2}\ , \qquad (10)$$

где I^{mn}_{pq} ·- изотропный тензор четвертого ранга [6].

$$K^{pqrs}_{ijmn} = \left\langle\widehat{\theta}^e_{ijmn}\cdot\widehat{\theta}^e_{pqrs}\right\rangle;\ \theta^e_{ijmn} = \theta_{ijmn}\cdot\Big\lfloor 1-\aleph^{\mathrm{II}}(\xi,S,N)\Big\rfloor.$$

Вероятность разрушения элементов микроструктуры $d^{\mathrm{II}}V$ описывают соотношением

$$P^{\mathrm{II}}(\xi,S) = 1 - \frac{1}{8\pi\cdot\sqrt{|H|}}\cdot\int\limits_S exp\left(-0{,}5\cdot\frac{K_{\alpha\beta\gamma\delta}}{|H|}\cdot\widehat{\xi}_{\alpha\beta}\cdot\widehat{\xi}_{\gamma\delta}\right)d\xi\ , \qquad (11)$$

где $|H|$ – определитель, составленный из компонентов H_{ij}^{mn}; K_{ijmn} – алгебраическое дополнение определителя $|H|$.

Макроскопическое разрушение конструкции наступает при нарушении целостности макроскопического элемента $d^{\mathrm{I}}V$. Разрушение $d^{\mathrm{I}}V$ в условиях циклического нагружения описывают случайной функцией $\aleph^{\mathrm{I}}(\vec{r},N)$. Моментную функцию первого порядка определяют с использованием зависимости

$$\left\langle \aleph^{\mathrm{I}}(\vec{r},N)\right\rangle = \frac{1}{d^{\mathrm{I}}V}\cdot\left[\int\limits_{d^{I}V}\int\limits_{0}^{N} P^{II}(\xi,S)\cdot\left\langle F(n)\right\rangle + \left\langle \hat{F}(n)\right\rangle\cdot\hat{\omega}^{II}(\xi,S)\right]\cdot d^{II}\cdot V\,dn\ , \quad (12)$$

где $\vec{r}$ – радиус-вектор рассматриваемой точки.

Как показано в работе [5], при независимом разрушении элементов $d^{\mathrm{II}}V$ накопление макроразрушений происходит согласно закону Пуассона. Вероятность разрушения конструкции (разделения тела на части) определяют как

$$P(N) = 1-(C_{\omega}!)^{-1}\left\langle \aleph^{\mathrm{I}}(\vec{r},N)\right\rangle\cdot C_{\omega}\cdot exp\left[-\left\langle \aleph^{\mathrm{I}}(\vec{r},N)\right\rangle\right], \quad (13)$$

где C_{ω} – мера повреждаемости, которую рассчитывают с использованием методики, описанной в работе [6].

Предложенный подход апробировали при расчете стальной тонкостенной цилиндрической оболочки (сталь СП-53), находящейся в условиях воздействия пульсирующего внутреннего давления. Для данной оболочки определяли зависимости случайных микроскопических напряжений и моментных функций распределения микроповреждений от числа циклов нагружения, рассчитывали средние значения микроповреждений и их дисперсии в зависимости от числа циклов нагружения, а также проводили оценку вероятности безотказной работы данной конструкции.

Установлено, что вероятность безотказной работы конструкций значительно снижается на первых циклах нагружения и при последующем нагружении уменьшается значительно медленнее, что обусловливается явлением приспособляемости, основной причиной которого является структурное упорядочивание.

4. Выводы

Предложенный подход позволяет учитывать структурные параметры материала конструкций, работающих при циклическом нагружении и, следовательно, получить более точную оценку надежности. Его применение может быть полезно для оценки надежности конструкций из композитных материалов с обязательным использованием обобщений, предложенных в работе [6].

Список литературы: 1. Переверзев Е.С. Случайные процессы в параметрических моделях надежности [Текст] / Е.С. Переверзев. – Киев: Наукова думка, 1987. – 235 с. 2. Богачев И.Н. Введение в статистическое металловедение [Текст] / И.Н. Богачев, Р.Н. Вайнштейн, С.Д. Волков. – М.: Металлургия, 1972. – 214 с. 3. Скачков В.А. Связанная задача деформирования *и разрушения микронеоднородных сред [Текст] / В.А. Скачков, Ю.В. Соколкин // Пятый Всесоюзный съезд по теоретической и прикладной механике. – Алма-Ата: Наука, 1991. – С. 322. 4. Колмогоров А.Н. Кривые в гильбертовом пространстве, инвариантные по отношению к однопараметрической группе движений [Текст] / А.Н. Колмогоров // Доклады АН СССР. – 1940. – Т.26. – С. 6-12. 5. Волков С.Д. Микромеханика композитных материалов [Текст] / С.Д. Волков, В.П. Ставров. – Минск: БГУ, 1977. – 382 с. 6. Скачков В.А. О связи прочностных и деформационных характеристик с разрушением композитных материалов [Текст] / В.А. Скачков, В.А. Леонтьев // Напряженное деформированное состояние и прочность конструкций. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1982. – С. 97-103.*

Поступила в редколлегию 25.11.2010

УДК 620.18

В.В. ГОНЧАРОВ, асистент, Інститут хімічних технологій Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, м. Рубіжне

Д.О. РЄЗНІЧЕНКО, магістрант, Інститут хімічних технологій Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, м. Рубіжне

М.В. НЕНЬКО, канд. техн. наук, доцент, Інститут хімічних технологій Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, м. Рубіжне

МОДИФІКУВАННЯ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ

У статті проведене дослідження впливу іонної імплантації алюмінію на мікрогеометрію зразка із нержавіючої сталі.
Ключові слова: алюміній, мікроструктура, іонна імплантація

В статье проведено исследование влияние ионной имплантации алюминия на микрогеометрию образца из нержавеющей стали.
Ключевые слова: алюминий, микроструктура, ионная имплантация

In the article research of influence of ionic implantation of aluminum on microgeometry of sample from stainless steel is considered.
Keywords: aluminum, microstructure, ionic implantation

1. Вступ

На даний час велика увага приділяється технологіям, здатним створювати композиції з мінімальним вмістом активного компоненту, які до того ж володіють необхідним спектром фізико-хімічних, механічних та теплоенергетичних властивостей. Зокрема, актуальним є застосування таких композитів в каталітичних технологіях. Але часто активними компонентами є дорогоцінні метали платинового ряду [1], що безпосередньо виявляється на собівартості отриманого елементу. Щоб знизити витрату недешевого каталізатору та уникнути його дифузії у глибину, на носій заздалегідь наносять «бар'єрний» шар модифікатору. Властивості отриманих композицій великою мірою залежать від того, яким способом проводили нанесення та які елементи застосовували в якості носія і модифікатора. Перспективним матеріалом для носіїв можна вважати нержавіючу сталь 12Х18Н10Т [2, 3], яка дуже поширена у хімічній технології. В якості модифікатора можна застосовувати алюміній у силу його високих термомеханічних та хімічних характеристик. В аспекті