УДК 539.3

МЕРА ПОВРЕЖДЁННОСТИ НАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, НАХОДЯЩИХСЯ В АГРЕССИВНОЙ СРЕДЕ

В.Н. Долгих*, к.ф.-м.н., доц.; Я.В. Долгих**, к.э.н.
*(*Украинская академия банковского дела*
***Сумский национальный аграрный университет)*

Степень износа играет важную роль при оценке уровня надёжности машин и оборудования, их стоимости. Физический износ связан с накоплением повреждений, вызванных в том числе и воздействием агрессивной среды. Определение степени повреждённости всей конструкции представляет сложную задачу, решение которой, как правило, возможно лишь путём проведения дорогостоящих экспериментов. Для уникальных конструкций, эксплуатация которых связана с повышенной опасностью для жизнедеятельности человека и состояния окружающей среды, проведение экспериментов по определению степени повреждённости всей конструкции в целом, как правило, невозможно. Повреждённость таких конструкций определяется и уточняется в процессе эксплуатации. При этом используется аппаратура, позволяющая определить уровень износа наиболее ответственных элементов конструкций. Для некоторых простых элементов конструкций определение повреждённости возможно расчётным путём.

В работе [1] для описания воздействия на объекты живой природы загрязнённой окружающей среды введена характеристика повреждённости, описываемая некоторой скалярной функцией $0 \le \Pi \le 1$. В начальном состоянии (при отсутствии повреждённости) $\Pi = 0$, с течением времени функция Π возрастает. Равенство $\Pi = 1$ является условием разрушения объекта. Ниже предлагается мера повреждённости для нагруженных элементов конструкций, находящихся в агрессивной среде.

В результате коррозионных процессов происходит изменение геометрических размеров элементов конструкций, что приводит к изменению коэффициента запаса прочности. Обозначим через $n(t)$ значение коэффициента запаса прочности в момент времени t, $[n]$ – заданный (расчётный) коэффициент запаса прочности. Условие прочности можно представить в виде $n(t) \le [n]$. Выразим повреждённость $\Pi(t)$ в момент времени t через коэффициенты запаса прочности:

$$\Pi(t) = \frac{n(0) - n(t)}{n(0) - [n]}. \qquad (1)$$

Определение повреждённости по формуле (1) связано с расчётом на прочность. Основным видом расчёта на прочность является расчёт по допускаемым напряжениям, при котором достижение эквивалентным напряжением, определяемым по той или иной гипотезе прочности, предельного значения хотя бы в одной точке конструкции отождествляется с нарушением прочности всей конструкции. Нарушением прочности считается не только возникновение признаков разрушения (достижение напряжением в опасной точке значения предела прочности, или предела выносливости), но и возникновение пластических деформаций (равенство расчётного напряжения пределу текучести).

Независимо от применяемой гипотезы прочности, условие прочности для опасной точки может быть записано в виде

$$\sigma_{экв}(t) = \frac{\sigma_{пред}}{n(t)} \le [\sigma] = \frac{\sigma_{пред}}{[n]}, \qquad (2)$$

где $n(t)$– фактический коэффициент запаса прочности;

$\sigma_{экв}(t)$ – расчётное (эквивалентное) напряжение;

$\sigma_{пред}$ $[\sigma]$ – предельное и допускаемое напряжения.

В качестве $\sigma_{пред}$ в формуле (2) принимают [2]:

1) для пластичных материалов – предел текучести σ_T (или условный предел текучести $\sigma_{0,2}$): $\sigma_{пред} = \sigma_T$ или $\sigma_{пред} = \sigma_{0,2}$;

2) для хрупкопластичных материалов – условный предел текучести на растяжение $\sigma_{0.2p}$ или на сжатие $\sigma_{0,2c}$: $\sigma_{пред} = \sigma_{0,2}$ ($\sigma_{0,2p}$ или $\sigma_{0,2c}$);

3) для хрупких материалов – предел прочности на растяжение $\sigma_{пч.p}$ или сжатие $\sigma_{пч.c}$: $\sigma_{пред} = \sigma_{пч}$ ($\sigma_{пч.p}$ или $\sigma_{пч.c}$).

Определим степень повреждённости элементов конструкций, работающих при различных напряжённых состояниях в агрессивной среде.

Расчёт повреждённости стержня при растяжении-сжатии без потери устойчивости.

При растяжении-сжатии стержня в поперечных сечениях возникают только нормальные напряжения, приводящиеся к равнодействующей силе N, направленной вдоль оси. Условие прочности (2) примет вид

$$\sigma(t) = \frac{N}{S(t)} = \frac{\sigma_{пред}}{n(t)} \le [\sigma], \tag{3}$$

где $S(t)$ – площадь поперечного сечения стержня в момент времени t.

Подставляя значение $n(t)$ из формулы (3) в формулу (1), получаем зависимость повреждённости от изменения площади поперечного сечения:

$$П(t) = \frac{S(0) - S(t)}{S(0) - S_{пр}}, \quad S_{пр} = \frac{N}{[\sigma]}. \tag{4}$$

Расчёт повреждённости при кручении.

При кручении вала круглого поперечного сечения в поперечных сечениях возникают лишь касательные напряжения τ. Условие прочности состоит в том, что наибольшее касательное напряжение в опасном сечении не должно превышать допускаемого касательного напряжения:

$$\tau_{\max}(t) = \frac{M_к}{W_p(t)} = \frac{\tau_{пред}}{n(t)} \le [\tau] = \frac{\tau_{пред}}{[n]}, \tag{5}$$

где $M_к$ – крутящий момент в расчётном поперечном сечении;

$W_p(t) = J_p(t) / \rho(t)$ – полярный момент сопротивления поперечного сечения;

$J_p(t)$ – полярный момент инерции поперечного сечения;

$\rho(t)$ – радиус поперечного сечения вала;

$\tau_{пред}$ $[\tau]$ – соответственно предельное и допускаемое касательные напряжения.

Проведя преобразования, аналогичные преобразованиям при выводе формулы (4), получим зависимость повреждённости от полярного момента сопротивления

$$П(t) = \frac{W_p(0) - W_p(t)}{W_p(0) - W_{p\,пр}}, \quad W_{p\,пр} = \frac{M_к}{[\tau]}. \tag{6}$$

При нестеснённом кручении валов некруглого поперечного сечения в формуле (6) полярный момент сопротивления W_p следует заменить моментом сопротивления при кручении $W_к$.

Расчёт повреждённости при чистом изгибе балки.

При чистом изгибе в поперечных сечениях балки возникают только нормальные напряжения σ. Условие прочности по нормальным напряжениям для балок, материал которых одинаково сопротивляется растяжению и сжатию, имеет вид

$$\sigma_{\max}(t) = \frac{M_{и}}{W_x(t)} = \frac{\sigma_{пред}}{n(t)} \le [\sigma], \tag{7}$$

где $W_x(t) = J_x(t) / y_{\max}(t)$ – осевой момент сопротивления поперечного сечения балки:

$J_x(t)$ – осевой момент инерции;

$y_{\max}(t)$ – расстояние от нейтральной оси до наиболее удалённой точки сечения.

С учётом условия прочности (7) формула (1) примет вид

$$П(t) = \frac{W_x(0) - W_x(t)}{W_x(0) - W_{x\,пр}}, \quad W_{x\,пр} = \frac{M_x}{[\sigma]} \tag{8}$$

Расчёт повреждённости при сложном напряжённом состоянии.

Расчёт на прочность при сложном напряжённом состоянии выполняют с применением гипотез прочности, формулирующих условия перехода материала в предельное напряжённое состояние [2].

Гипотезы прочности позволяют заменить заданное объёмное или плоское напряжённое состояние эквивалентным (равноопасным) одноосным напряжённым состоянием $\sigma_{экв}$. Эквивалентное напряжение рассчитывается по главным нормальным напряжениям $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, действующим по главным площадкам [2].

Эквивалентные напряжения рассчитывают по следующим гипотезам прочности:

1) гипотеза наибольших касательных напряжений

$$\sigma_э = \sigma_1 - \sigma_3 .$$

Используется для материалов, одинаково сопротивляющихся растяжению или сжатию, вполне удовлетворительно согласуется с результатами экспериментов;

2) гипотеза Мора

$$\sigma_э = \sigma_1 - \nu\sigma_3 ,$$

где для хрупких материалов $\nu = \sigma_{пч\ p} / \sigma_{пч\ c}$, ($\sigma_{пч\ p}$, $\sigma_{пч\ c}$ – пределы прочности на растяжение и сжатие соответственно); для хрупко-пластичных материалов $\nu = \sigma_{0,2p} / \sigma_{0,2c}$; для пластичных материалов $\nu = 1{,}0$;

3) гипотеза удельной потенциальной энергии формоизменения

$$\sigma_э = \sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right]} .$$

Используется для материалов, одинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию. Несколько лучше согласуется с результатами экспериментов, чем гипотеза наибольших касательных напряжений.

Сопоставление эквивалентного напряжения с допускаемым $[\sigma]$ или предельным $\sigma_{пред}$ напряжением для данного материала при одноосном растяжении позволяет оценить прочность для сложного напряжённого состояния материала.

С условием прочности (2) формула (1) запишется следующим образом:

$$П(t) = \left[1 - \frac{\sigma_{экв}(0)}{\sigma_{экв}(t)}\right] \Big/ \left[1 - \frac{\sigma_{экв}(0)}{[\sigma]}\right]. \tag{10}$$

SUMMARY

The ways of definition of a degree of damage of elements of the designs working in aggressive environment are offered.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгих В.Н., Долгих Я.В. Применение некоторых идей механики разрушения в экологии // Вісник СумДУ. – 1995.–№4.–С.121-124.
2. Беляев Н.М. Сопротивление материалов.– М.: Наука, 1965.– 856 с.

Поступила в редколлегию 12 декабря 2002г.