

## **АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ В УСЛОВИЯХ ОДНОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

В. П. Радченко, М. В. Шершнева, В. В. Цветков  
*Самарский государственный технический университет,*  
*radch@samgtu.ru*

Проблема оценки надежности элементов конструкций в условиях ползучести затрудняется в силу ряда причин: большой разброс данных по деформации ползучести и длительной прочности даже в лабораторных условиях; физическая и стохастическая нелинейность определяющих реологических уравнений деформирования и разрушения материалов и другие факторы.

Классические методы решения стохастических краевых задач на основе стохастических реологических моделей практически непригодны для оценки ресурса конкретной конструкции, так как полная стохастическая картина для распределения параметров неупругой деформации по области интегрирования отсутствует. Поэтому для решения такого рода задач необходимо использовать неклассические способы построения стохастических моделей для элементов конструкций.

В настоящей работе выполнено обоснование необходимости применения обобщенных стохастических моделей для оценки показателей надежности элементов конструкций в условиях ползучести и приведена методика их построения. Суть данного подхода состоит в том, что, рассматривая конструктивный элемент как единое целое (специфический образец, хотя и сложной структуры), можно установить связь между входными (нагрузки) и выходными (перемещения, деформации, углы закручивания и т.п.) параметрами аналогично тому, как строятся модели ползучести для одноосного растягиваемого образца. Такой подход основан на полной аналогии кривых ползучести для растягиваемого стержня при постоянном напряжении и соответствующих диаграмм в координатах «обобщенное перемещение-время» конструктивного элемента как целого при постоянных обобщенных нагрузках. Предложены обобщенные стохастические модели для конкретных конструктивных элементов в условиях однопараметрического нагружения (стержневые элементы, толстостенная труба под действием внутреннего давления, сплошной цилиндр в условиях чистого кручения, балка в условиях чистого изгиба, тонкостенные цилиндрические оболочки).

По структуре определяющие уравнения для элемента конструкции при однопараметрическом нагружении по форме идентичны уравнению при растяжении одноосного стержня при ползучести. Разработан метод стохастической линеаризации уравнений, на основании которого предложен метод оценки элементов конструкций по деформационному критерию отказа. Параметрический критерий отказа для рассматриваемой стохастически неоднородной конструкции может быть сформулирован в виде некоторого соотношения для обобщенной деформации ползучести  $p$ . Предельное значение деформации  $p^*$  предполагается детерминированной величиной. Если выполняется соотношение  $p(t) \leq p^*$ , условие прочности считается выполненным, а элемент конструкции является работоспособным. При выполнении условия  $p(t) > p^*$  происходит локальный отказ, что приводит к нарушению работоспособности всего элемента конструкции.

Основной количественной характеристикой надежности является вероятность безотказной работы. Поскольку обобщенная деформация ползучести представляет собой неубывающую функцию, функция надежности  $P(t)$ , описывающая вероятность безотказной работы на отрезке  $[0, t]$ , равна вероятности пребывания случайной функции

$p(t)$  в допустимой области  $(0, p^*)$  и определяется формулой  $P(t) = P\{p(t) \in (0, p^*)\}$ .

Тогда для вероятности безотказной работы имеем

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_p(t)} \int_0^{p^*} e^{-\frac{(x-m_p(t))^2}{2S_p^2(t)}} dx, \quad (1)$$

где  $m_p$  – математическое ожидание, а  $S_p^2$  – дисперсия деформации ползучести  $p = p(t)$ .

Вероятность  $P(t)$  можно использовать для назначения ресурса конструктивного элемента. Назначенный ресурс  $T_*$  определяют так, чтобы вероятность обеспечения  $T_*$  была равна заданному (конкретному) значению  $P^*$  вероятности безотказной работы.

В качестве примера приведем расчет ресурса по деформационному критерию отказа простейшего конструктивного элемента – растягиваемого стержневого образца из стали 10X18H10T при  $T = 850^0C$ . Соответствующие экспериментальные данные по ползучести получены Локощенко А.М. и Шестериковым С.А. и приведены в [1] при четырех уровнях напряжения  $\sigma_0 = \{39,24; 49,05; 58,86; 78,48\}$  МПа (количество испытанных образцов соответственно 6,7,6,2). В качестве предельно допустимой величины деформации ползучести принято  $p^* = 0,04$ .

В таблице приведены расчетные значения времени отказа ( $t_{расч}$ ) по предложенной модели с заданными значениями вероятности безотказной работы  $P^* = \{0,9; 0,95; 0,99\}$ . Здесь же представлены экспериментальные значения времени отказа  $t_{эксп}$  для каждой реализации (время, при котором деформация ползучести конкретной реализации достигает значения  $p^* = 0,04$ ).

$\sigma_0$	$P(t)$	$t_{расч}$ , час	$t_{эксп}$ , час
39,24	0,99	24,5	32,9; 29
	0,95	26,5	28,4; 28,4;
	0,9	27,7	32,9; 29,7
49,05	0,99	11	12; 13,55;
	0,95	11,9	14,2; 15,2; 20;
	0,9	12,4	13,55; 13,55
58,86	0,99	5,7	6; 10,3;
	0,95	6	11,7; 12,8;
	0,9	6,3	13,5; 14,5
78,48	0,99	1,94	3,14; 4,2
	0,95	2	
	0,9	2,15	

Как следует из анализа данных таблицы, при уровне вероятности 0,99 все экспериментальные значения (правый столбец таблицы) лежат правее времени безотказной работы, вычисленного по формуле (1). При значениях вероятности 0,95 и 0,9 имеются экспериментальные значения времени безотказной работы, которые лежат левее расчетного значения, т.е. имеются «выбросы» из расчетного значения ресурса. Поэтому в прикладных расчетах рекомендуется использовать величину вероятности 0,99. Приведены модельные расчеты для оценки ресурса толстостенной трубы, балки при изгибе, кручении вала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Локощенко А.М., Шестериков С.А. Методика описания ползучести и длительной прочности при чистом растяжении // *Ж. прикл. механики и технич. физики*, 1980. №3. С. 155-159.