УДК 539.376

И. А. ДОЯР, В. П. ПОШИВАЛОВ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: vposhivalov@gmail.com

В работе предложен метод прогнозирования долговечности конструкционных материалов при изотермической ползучести в условиях сложного напряженного состояния, который апробирован на экспериментальных данных на длительную прочность трубчатых образцов из жаропрочного никелевого сплава ЭИ437БУ-ВД при температуре 650 ºС и одновременном действии осевого и касательного напряжения. В качестве параметрической модели долговечности приняты степенная, экспоненциальная и дробно-степенная зависимости времени до разрушения от эквивалентного напряжения. Рассмотрены четыре вида зависимости для эквивалентного напряжения.

На основании экспериментальных данных по длительной прочности трубчатых образцов из жаропрочного никелевого сплава ЭИ437БУ-ВД при температуре 650 °С с использованием метода наименьших квадратов получены оценки постоянных, входящих в зависимости длительной прочности, для каждого из четырех принятых выражений для эквивалентных напряжений.

Для каждой параметрической модели долговечности получены значения двух видов ошибок прогнозирования. Показано, что для всех параметрических моделей долговечности минимальные значения этих ошибок достигаются, когда за эквивалентное напряжение принимается критерий Мизеса.

Для экспоненциальной модели длительной прочности и эквивалентного напряжения по Мизесу проведена проверка гипотезы о нормальном распределении случайной величины постоянной долговечности на основании значений её выборочного вектора. В следствии малого количества экспериментальных данных для данной проверки используется статистический критерий Шапиро–Уилка.

Получены графики функции и плотности распределения времени до разрушения для трубчатых образцов из жаропрочного никелевого сплава ЭИ437БУ-ВД при осевом напряжении 490,5 МПа, касательном напряжении 245 МПа и температуре 650 °С, а также прогнозируемые значения назначенного ресурса для различных значений параметров нагружения при фиксированных уровнях доверительной вероятности. Показано, что при уровне доверительной вероятности 0,99 все экспериментальные значения времени до разрушения лежат правее назначенного ресурса, в отличие от значений, соответствующих уровням доверительной вероятности 0,9 и 0,95.

Предложена методика идентификации констант ползучести материала, которая основана на статистической обработке экспериментальных кривых ползучести и применении методов теории вероятностей и математической статистики, а также методов оптимизации.

***Ключевые слова**: длительная прочность, модели долговечности, постоянные ползучести, время до разрушения, эквивалентное напряжение, ошибки прогнозирования.*

1. *Локощенко А. М.* Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов. М.: МГИУ, 2007. 264 с.
2. *Johnson A. E.* Complex-stress creep of metals. Metallurgical Reviews. 1960. V. 5, № 20. P. 447–506.
(*Джонсон.* Ползучесть металлов при сложном напряжённом состоянии. Механика. Период. сб. перев. иностр. статей. 1962. № 4. С. 91–146.)
3. *Локощенко А. М., Шестериков С. А.* Ползучесть. Итоги науки. Сер. Механика. М.: ВИНИТИ, 1965. С. 177–227.
4. *Шестериков С. А., Локощенко А. М.* Ползучесть и длительная прочность метал лов. Итоги науки и техники. Сер. Механ. деформ. тверд. тела. М.: ВИНИТИ, 1980. Т. 13. С. 3–104.
5. *Браун Р. Дж., Лонсдейл Д., Флюитт П.* Испытания на длительную прочность при многоосном напряжённом состоянии и анализ данных для жаропрочных сталей. Тр. Амер. о-ва инж.-механиков. Теорет. основы инж. расчетов. 1982. Т. 104, № 4. С. 56–65.
6. *Писаренко Г. С., Лебедев А. А.* Деформирование и прочность материалов при сложном напряжённом состоянии. Киев: Наук. думка, 1976. 415 с.
7. *Лебедев А. А., Ковальчук Б. И., Гигиняк Ф. Ф., Ламашевский В. П.* Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии / Под общ. ред. *А. А. Лебедева*. Киев: Издат. дом «Ин Юре», 2003. 540 с.
8. *Голубовский Е. Р., Демидов А. Г.* Оценка длительной прочности при сложном напряженном состоянии сплава ЭИ437 БУ-ВД для дисков ГТД. Вестник двигателестроения. Запорожье. ОАО «Мотор-Сич», 2008. С. 106–110.

9. *Локощенко А. М., Назаров В. В., Платонов Д. О., Шестериков С. А.* Анализ критериев длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии. Изв. РАН. Механика твердого тела. 2003. № 2. С. 139–149.
10. *Локощенко А. М.* Эквивалентные напряжения в расчетах длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии (обзор). Известия Саратовского университета. Сер. «Математика. Механика. Информатика» 2009. Том 9. Вып. 4. Ч. 2. С. 128–135.
11. *Локощенко А. М.* К выбору критерия длительной прочности при сложном напряжённом состоянии. Проблемы прочности. 1989. № 9. С. 3–6.
12. *Doyar I., Poshyvalov V.* Development of a stochastic model of failure of structural materials in creep at hardening stage. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 2016. Vol.3, No5(81). С. 25–31.
13. *Ширяев А. Н.* Вероятность. М.: Наука, 1989. 640 с.

Получено 15.05.2019,
в окончательном варианте 14.06.2019