

МЕТОДЫ РАСЧЕТНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

К. А. Лонин, В. А. Панов, В. Л. Патрушев, Д. В. Савчук, С. А. Соловьев, Д. Н. Шишулин

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород

Введение

При разработке и обосновании прочности механических систем реакторной установки (РУ) с охлаждением перекачиваемой водой, необходимо иметь данные о длительных физико-механических свойствах на требуемый ресурс конструкционных материалов отдельных элементов работающих при температурах, при которых проявляется температурная ползучесть.

Одной из основных характеристик, определяющих прочность и работоспособность конструкции в условиях высоких температур и длительном ресурсе, является параметр длительной прочности.

Экспериментальное обоснование длительной прочности элементов оборудования, а также определение механических характеристик и предела длительной прочности для назначенного ресурса, требует большого объема экспериментальных исследований, что оказывается нецелесообразным по экономическим причинам и по причинам безопасности вследствие возможных разрушений деталей.

Поэтому при проектировании важен вопрос о прогнозировании физико-механических характеристик конструкционных материалов путем разработки методики экстраполяции данных лабораторных испытаний материалов, полученных за ограниченное время (не менее одного временного порядка). Методика должна учитывать диапазон рабочих температур, напряжений, время прохождения режима и его цикличность. Проводимое прогнозирование значений физико-механических характеристик на значительно большее время должно предполагать достоверность последующей оценки прочности и ресурса изделий в эксплуатационных условиях.

Целью работы является выбор методики и прогнозирование значений длительных механических свойств конструкционных материалов механических систем РУ для расчетного обоснования прочности и назначенного ресурса.

Особенности конструкции

В процессе эксплуатации системы РУ на конструкцию влияют следующие факторы: разнородность конструкционных материалов с различными физико-механическими свойствами, высокий уровень на-

пряжений в элементах, высокий назначенный ресурс системы, и высокая рабочая температура.

Механизмы разрушения при ползучести

Проблема экстраполяции данных кратковременных испытаний на длительную временную базу может решаться только на основе физически обоснованных методов преобразования экспериментальных кривых зависимости времени до разрушения от напряжения одноосного растяжения при некоторых базовых температурах к единой приведенной кривой длительной прочности. При этом необходимо учитывать изменение типов механизмов накопления повреждений в зависимости от уровня температур и величины напряжений.

В настоящее время экспериментально установлено несколько типов механизмов накопления повреждений в металлических конструкционных материалах при ползучести:

- внутриверенное накопление повреждений и разрушение (рис. 1) при высоких напряжениях, соответствующее малым долговечностям: десятки часов при высокой температуре, сотни часов при невысокой температуре;

- межзеренное накопление повреждений в виде клиновидных трещин (рис. 2) при средних напряжениях, соответствующих долговечности порядка сотен часов при высокой температуре и тысяч часов при низких температурах;

- межзеренное накопление повреждений в виде зарождения, развития и слияния пор при невысоких напряжениях и температурах, соответствующих долговечности от 10^5 до 10^6 ч;

С увеличением температуры происходит смещение зоны интеркристаллитного разрушения в сторону меньших долговечностей. Эта закономерность положена в основу известных параметрических методов экстраполяции длительной прочности таких, как методы Ларсона – Миллера, Мэнсона – Хафгерда, Орра-Шерби-Дорна, Мэнсона – Бровнаи др.

Используя эти методы, в экспериментах на длительную прочность механизма при достижении накопления повреждений в виде межзеренного зарождения, развития, роста и слияния пор, реализуемых в эксплуатационных условиях, можно выполнить экстраполяционные расчеты на практически необходимые назначенные сроки службы конструктивных

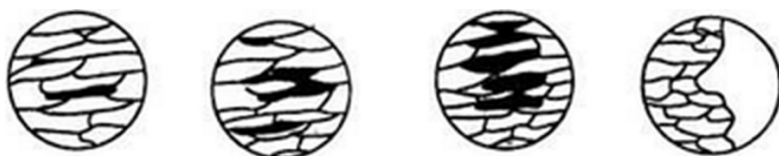


Рис. 1. Внутризеренное накопление повреждений и разрушение

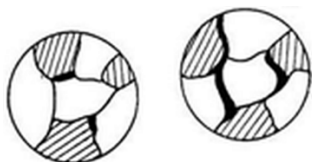


Рис. 2. Межзеренное накопление повреждений в виде клиновидных трещин



Рис. 3. Межзеренное накопление повреждений в виде зарождения и слияния пор

элементов до 10^6 ч., определив характерные для каждого метода параметры.

Параметр Ларсона – Миллера

Параметр Ларсона – Миллера рассчитывается по формуле:

$$P(\sigma) = T \cdot (C + \ln t_f), \quad (1)$$

где T – абсолютная температура материала, К;
 t_f – продолжительность нагружения (от начала нагружения до разрушения), ч;
 C – постоянная (определяется для каждого конкретного материала).

Численные значения C определяют по экспериментальным данным для двухуровневых температур.

Считается, что параметр Ларсона – Миллера можно применять и для аппроксимации кривых, соответствующих заданному постоянному значению деформации ползучести, в основном соответствующему окончанию второго участка кривой ползучести.

Параметр Орра – Шерби – Дорна

Функциональная зависимость между временем до разрушения, температурой и параметром по методу Орр – Шерби – Дорна выражается формулой:

$$P(\sigma) = \lg t - \frac{D}{T}, \quad (2)$$

где D – постоянная (характеризует угол наклона параллельных прямых одинаковых уровней напряже-

ний в координатах «логарифм времени – обратная температура»).

Параметр Мэнсона – Хаферда

Для длительной прочности параметр Мэнсона – Хаферда рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{T - T_a}{\ln t - \ln t_a}, \quad (3)$$

где T_a , t_a – постоянные, определяемые как координаты точки-полюса, в которой пересекаются прямые линии одинаковых значений напряжений (в координатах $\ln t - T$).

Точка пересечения является случайной, поэтому получаемые решения в отдельных случаях более достоверны.

Параметр Мэнсона – Хаферда отличается удобством использования при большом объеме экспериментальных данных.

Параметр Мэнсона – Бровна

Параметр Мэнсона – Бровна рассчитывается по формуле:

$$P(\sigma) = \frac{\ln t - \ln t_a}{(T - T_a)^R}, \quad (4)$$

R – учитывает форму кривых одинаковых значений напряжений в координатах $\ln t - T$ ($R < 0$ – кривые вогнутые, $R > 1$ кривые выпуклые).

В работах [1–2], на основе обработки экспериментальной информации о ползучести для широкого класса конструкционных материалов, показано, что экспериментальные кривые длительной прочности могут быть описаны единой зависимостью, являющейся обобщением соотношения Дорна:

$$\lg t_* = 9T_*/T + f\left(\sigma \cdot 10^{-0,525T_*/T}\right),$$

$$f = A - sh\left[a\left(\sigma \cdot 10^{-0,525T_*/T}\right)\right]^q. \tag{5}$$

где σ – напряжение при одноосном растяжении образца;

T – абсолютная температура материала, К;

T_* – некоторая критическая температура, К;

t_* – продолжительность нагружения (время до разрушения);

A, a, q – экспериментально определяемые параметры материала.

Экспериментальные результаты могут быть описаны единой зависимостью во всем диапазоне температур и напряжений (экспериментальные кривые длительной прочности могут быть приведены к некоторой фиксированной температуре $T_{пр}$), если принять соотношение:

$$\lg t_{*пр} = 9T_*/T_{пр} + A - sh\left[a\left(\sigma_{пр} \cdot 10^{-0,525T_*/T_{пр}}\right)\right]^q.$$

Параметрические методы прогнозирования

Прогнозирование механических характеристик по представленным методам возможно не более чем на 1–1,5 порядка по времени относительно экспериментальной базы.

Значения расчетной дисперсии S^2 и корреляционного отношения r для описания температурно-временными зависимостями характеристик сопротивления многоциклового усталости жаропрочных никелевых сплавов приведены в таблице.

Температурно-временные зависимости характеристик сопротивления многоциклового усталости

| № п/п | Марка сплава | T, K | Диапазон долговечностей, цикл, ч. | Вид и частота нагружения, Гц | Кол-во экспериментальных точек | Зависимости | | | | | |
|-------|--------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------|----------|---------------|----------|------------------|----------|
| | | | | | | Ларсона – Миллера | | Шерби – Дорна | | Мэнсона – Бровна | |
| | | | | | | \hat{s}^2 | ρ^2 | \hat{s}^2 | ρ^2 | \hat{s}^2 | ρ^2 |
| 1 | ЭИ867 | 873, 1073, 1173, 1223, 1273 | $10^5 - 10^8$ ($1-10^3$) | Растяжение – сжатие, 35 | 79 | 0,296 | 0,616 | 0,557 | 0,742 | 0,518 | 0,773 |
| 2 | ВЖЛ12У | 873, 1073, 1173, 1273, 1373 | $10^4 - 3 \cdot 10^7$ (0,1–250) | Растяжение – сжатие, 35 | 85 | 0,46 | 0,60 | 0,45 | 0,62 | 0,39 | 0,65 |

Используя модифицированный метод Дорна для материала Бр.КН1-3, была проведена экстраполяция длительных механических свойств на требуемую базу – 10000 ч на основе лабораторных испытаний, полученных на базе до 1000 ч.

Определены напряжения и температура испытаний с обоснованием неизменности механизма разрушения.

Проведены экспериментальные исследования при выбранных значениях времени разрушения, напряжений и температуры

Обработаны экспериментальные результаты и определены параметры, входящие в уравнения (6).

Проведена проверка адекватности выбранных критериев и экспериментально определенных параметров путем сравнения расчетной и имеющейся экспериментальной информации. Сравнение расчетных значений кривой длительной прочности и экспериментально полученных данных, показало, что погрешность в определении напряжения разрушения по использованному соотношению составляет около ~10 %, что является удовлетворительным результатом.

Построены кривые длительной прочности для материала Бр. КН1 в координатах $\lg \sigma_{пр} - \lg t_{пр}$ (рис. 4) и в координатах $\sigma_{пр} - t_{пр}$ (рис. 5).

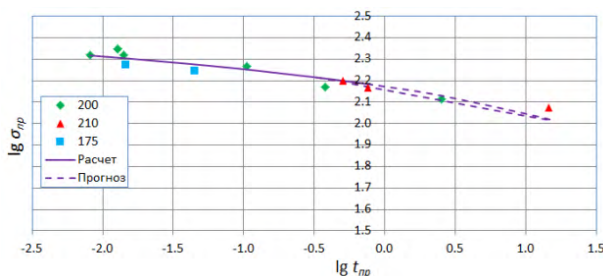


Рис. 4. Кривые длительной прочности для материала Бр. КН1

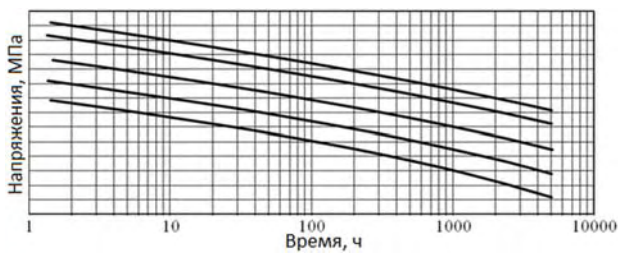


Рис. 5. Кривые длительной прочности для материала Бр. КН1

Заключение

Использование параметрических методов прогнозирования длительных механических свойств позволяет значительно сократить объем эксперимен-

тальных исследований, что выгодно в экономическом плане.

Результаты исследований показали, что использованный метод прогнозирования длительных механических свойств материала Бр.КН1-3 можно применять в дальнейшей работе.

Литература

1. Аршакуни А. Л. К выбору температурных зависимостей длительной прочности жаропрочных металлических материалов // Изв. вузов. 1987. № 6. С. 18–21.
2. Шестериков С. А., Аршакуни А. Л., Череева Л. В. Метод температурно-силового прогнозирования длительной прочности металлов // Проблемы прочности. 1989. № 9. С. 6–9.